



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE EXOSQUELETO DE REHABILITACIÓN
MOTORA DE MANO PARA PACIENTES AFECTADOS POR ARTROSIS**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO

INGENIERO EN BIOMÉDICA

PRESENTADO POR:

21841061 ALLISON SARAHI OVIEDO IRAHETA

21821061 ROBERTO ENRIQUE DOMÍNGUEZ FLORES

ASESOR: MANUEL ADALID GAMERO

CAMPUS SAN PEDRO SULA; ENERO, 2023

AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN DEL AUTOR(ES) PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTALY PUBLICACIÓN FÍSICA Y ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN DE UNITEC Y CESIÓN DE DERECHOS PATRIMONIALES

Señores

CENTRO DE RECURSOS PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACION (CRAI)

San Pedro Sula, Cortés

Estimados Señores:

La presentación del documento de tesis forma parte de los requerimientos y procesos establecidos de graduación para alumnos de pregrado de UNITEC.

Nosotros, Allison Sarahi Oviedo Iraheta y Roberto Enrique Dominguez Flores, de San Pedro Sula autor(es) del trabajo de grado titulado: Diseño y construcción de un prototipo de exoesqueleto de rehabilitación motora de mano para pacientes afectados por artrosis, presentado y aprobado en el año 2023, como requisito para optar al título de Profesional de Ingeniero Biomédico, autorizo a:

Las Bibliotecas de los Centros de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI) de la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), para que, con fines académicos, pueda libremente registrar, copiar y usar la información contenida en él, con fines educativos, investigativos o sociales de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en las salas de estudio de la biblioteca y la página Web de la universidad.

Permita la consulta y la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

De conformidad con lo establecido en el artículo 19 de la Ley de Derechos de Autor y de los Derechos Conexos; los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Es entendido que cualquier copia o reproducción del presente documento con fines de lucro no está permitida sin previa autorización por escrito de parte de los principales autores.

En fe de lo cual, se suscribe la presente acta en la ciudad de San Pedro Sula a los 24 días del mes de enero de dos mil veintitrés.



Allison Sarahi Oviedo Iraheta

21841061



Roberto Enrique Dominguez Flores

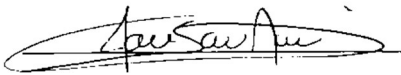
21821061

HOJA DE FIRMAS

Los abajo firmantes damos fe, en nuestra posición de miembro de Terna, Asesor y/o jefe Académico y en el marco de nuestras responsabilidades adquiridas, que el presente documento cumple con los lineamientos exigidos por la Facultad de Ingeniería y los requerimientos académicos que la Universidad dispone dentro de los procesos de graduación.



Ing. Manuel Gamero
Asesor metodológico



Ing. Jared Saucedo
Miembro de terna



Dra. Rosalina Zuniga
Miembro de terna



Ing. Reyna Valle
Coordinadora de terna
Jefe académico de Ingeniería en biomédica

AGRADECIMIENTOS

"A mi madre por siempre inculcarme que todo es posible si se trabaja duro para lograrlo, darme su amor y nunca soltarme la mano. A mi padre por siempre darme apoyo incondicional en todo momento y sus sabios consejos, sin ustedes esto no sería posible. A mi hermano, quien siempre me ha demostrado su amor incondicional y su apoyo. Cada uno de mis logros es gracias a ustedes. Ustedes son la razón por la cual sé que, aunque haya tropiezos en el camino a su lado siempre lograré cada una de mis metas.

No hace falta decir que este logro también es de mi familia, mis abuelas y mis tíos quienes siempre me han brindado su cálido apoyo y amor."

-Allison Sarahi Oviedo Iraheta

"A mis padres, ustedes han sido el motor que ha impulsado todos mis sueños, los cuales me han apoyado durante este camino. Siempre han sido los mejores guías de vida y hoy que concluyo mis estudios, este es logro es tan ustedes como mío. Orgulloso de los padres que son y agradecido que estén a mi lado en este momento tan importante.

A mi abuela, sus palabras siempre fueron sabias y me forjaron a la persona que soy hoy en día. Aunque no se encuentre conmigo en este momento tan importante, siempre fue mi mejor compañía y mi persona favorita de toda la vida. Siempre estará en mi corazón, la amo constantemente."

-Roberto Enrique Domínguez Flores

Por sobre todo agradecemos a Dios por iluminar este largo camino, a nuestros profesores y compañeros quienes nos acompañaron a lo largo de nuestra carrera universitaria.

RESUMEN EJECUTIVO

La artrosis de mano es una enfermedad que permite la degeneración de las articulaciones, esto perjudica la movilidad de la mano. La rehabilitación motora permite que los pacientes con mano artrósica puedan retomar el uso natural de su mano. Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo y es no experimental, se utilizó la metodología en V para el desarrollo del prototipo. La construcción del prototipo se dividió en tres sistemas: sistema estructural, sistema biomecánico y sistema de control. Utilizando el modelado e impresión 3D se lograron diseñar las piezas utilizadas en el ensamblaje final del prototipo. Con el uso de simulaciones se determinó la seguridad del material utilizado y la resistencia de las piezas. Los resultados de esta investigación indican que el presente prototipo es capaz de realizar movimientos que permiten al usuario completar ejercicios de rehabilitación.

Palabras clave- Artrosis, exoesqueleto, mano, rehabilitación motora.

ABSTRACT

Hand osteoarthritis is a disease that allows the degeneration of the joints, this impairs the mobility of the hand. Motor rehabilitation allows patients with arthritic hands to resume the natural use of their hand. This research has a quantitative approach and is non-experimental, the V methodology was used for the development of the prototype. The construction of the prototype was divided into three systems: structural system, biomechanical system, and control system. Using 3D modeling and printing, it was possible to design the parts used in the final assembly of the prototype. With the use of simulations, the safety of the material used, and the resistance of the pieces were determined. The results of this investigation indicate that the present prototype can perform movements that allow the user to complete rehabilitation exercises.

Keywords- Exoskeleton, hand, motor rehabilitation, osteoarthritis.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
	2.1. PRECEDENTES DEL PROBLEMA	3
	2.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	4
	2.3. JUSTIFICACIÓN	4
	2.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	5
	2.4.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN GENERAL	5
	2.4.2. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN ESPECÍFICAS	5
	2.5. OBJETIVOS	5
	2.5.1. OBJETIVO GENERAL	5
	2.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
III.	MARCO TEÓRICO	7
	3.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL	7
	3.1.1. FABRICACIÓN DE EXOSQUELETOS PARA REHABILITACIÓN DE MANO EN EL MUNDO	7
	3.1.2. ACCIONAMIENTO DE EXOSQUELETOS DE MANO	10
	3.2. ARTROSIS	11
	3.2.1. FACTORES DE RIESGO	13
	3.2.2. TIPOS DE ARTROSIS DE MANO	15
	3.2.3. PREVALENCIA E INCIDENCIA	17
	3.3. ANATOMÍA DE LA MANO	18
	3.3.1. ACCIONES DE LOS DEDOS	20
	3.3.2. ACCIONES DEL PULGAR	21
	3.4. RANGO DE MOVILIDAD DE LA MANO	22
	3.4.1. RANGO DE MOVILIDAD DE LA MUÑECA	22
	3.4.2. RANGO DE MOVILIDAD DE LOS DEDOS	23
	3.4.3. FLEXIÓN Y EXTENSIÓN DEL PULGAR	25
	3.5. TERAPIA DE REHABILITACIÓN	29
	3.5.1. FISIOTERAPIA	29
	3.5.2. EJERCICIOS DE FISIOTERAPIA PARA MANO ARTRÓSICA	30
IV.	METODOLOGÍA	34
	4.1. ENFOQUE	34
	4.2. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN	34
	4.2.1. VARIABLES DEPENDIENTES	35
	4.2.2. VARIABLES INDEPENDIENTES	35
	4.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS	36
	4.4. MATERIALES	38
	4.4.1. FILAMENTO PLA PARA IMPRESIÓN 3D	38
	4.4.2. ARDUINO MEGA 2560 RV3	40
	4.4.3. ACTUADOR LINEAL JQDML	41
	4.4.4. MÓDULO DE ALTA POTENCIA HILETGO BTS7960 43	42

4.4.5.	FUENTE DE ENERGÍA CONMUTADA 12V	43
4.5.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO	44
4.5.2.	NIVELES DE SISTEMAS Y SUBSISTEMAS	44
4.5.3.	SISTEMA ESTRUCTURAL	45
4.5.4.	SISTEMA BIOMECÁNICO.....	47
4.5.5.	SISTEMA DE CONTROL	50
4.6.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	51
4.7.	MATRIZ METODOLÓGICA	52
4.8.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	53
V.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	54
5.1.	SISTEMA ESTRUCTURAL	54
5.1.1.	INTEGRACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL	56
5.1.2.	ELABORACIÓN DE PARTES	57
5.1.3.	PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE PARTES	59
5.2.	PROGRAMACIÓN DEL PROTOTIPO	66
5.2.1	PSEUDO CÓDIGO	71
5.3.	INTEGRACIÓN SISTEMA ELÉCTRICO.....	72
5.4.	INTEGRACIÓN SISTEMA ELECTRÓNICO	73
5.4.1.	MODELO ESQUEMÁTICO DE CONEXIONES ELECTRÓNICAS	73
5.4.2.	MONTAJE DEL SISTEMA ELECTRÓNICO.....	73
5.5.	INTEGRACIÓN SISTEMA BIOMECÁNICO.....	76
5.5.1.	MONTAJE PROTOTIPO DE EXOSQUELETO DE MANO.....	76
5.6.	RESULTADOS DE COSTOS	80
VI.	CONCLUSIONES.....	82
VII.	RECOMENDACIONES.....	83
VIII.	APLICABILIDAD/ IMPLEMENTACIÓN.....	84
IX.	EVOLUCIÓN DE TRABAJO ACTUAL/TRABAJO FUTURO	85
X.	CONCORDANCIA DE LOS SEGMENTOS DE LA TESIS CON LA INVESTIGACIÓN	86
	BIBLIOGRAFÍA.....	88

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Exoesqueleto ReLab tenoexo.....	8
Ilustración 2. Exoesqueleto ReHand en diferentes posiciones. a) Mano extendida; b) Vista palmar; c) Mano flexionada; d) Vista palmar flexionada.....	9
Ilustración 3. Métodos de accionamiento.....	10
Ilustración 4. Incidencia por 100 años-persona.....	11
Ilustración 5. Articulaciones afectadas por artrosis de mano.....	12
Ilustración 6. Artrosis de las interfalángicas distales.....	16
Ilustración 7. Artrosis de interfalángicas proximales.....	16
Ilustración 8. Ligamentos y articulaciones de la mano.....	18
Ilustración 9. Huesos de la mano humana.....	19
Ilustración 10. Acciones de los dedos de la mano.....	20
Ilustración 11. Acciones del dedo pulgar.....	21
Ilustración 12. Rango de movilidad de la muñeca: a) Desviación Cubital y Radial, b) flexión y extensión... ..	22
Ilustración 13. Arcos de movilidad de la articulación metacarpofalángica: flexión y extensión.....	24
Ilustración 14. Arcos de movilidad de la articulación interfalángica distal: flexión y extensión.....	24
Ilustración 15. Arcos de la movilidad de la articulación interfalángica proximal: flexión y extensión.....	25
Ilustración 16. Abducción y aducción de los dedos.....	25
Ilustración 17. Abducción transpalmar del pulgar.....	26
Ilustración 18. Flexión y extensión del pulgar: Articulación Metacarpofalángica.....	26
Ilustración 19. Flexión y extensión del pulgar: Articulación Interfalángica.....	27
Ilustración 20. Abducción y aducción palmar del pulgar.....	27
Ilustración 21. Organigrama variables dependientes e independientes.....	34
Ilustración 22. Logo SolidWorks.....	36
Ilustración 23. Logo Arduino.....	36
Ilustración 24. Logo Proteus.....	37
Ilustración 25. Máquina de impresión 3D.....	37
Ilustración 26. Filamento PLA.....	39
Ilustración 27. Arduino Mega 2560 RV3.....	40
Ilustración 28. Actuador Lineal JQDML.....	41
Ilustración 29. HiLetgo BTS7960 43.....	42
Ilustración 30. Fuente de energía conmutada 12V.....	43
Ilustración 31. Metodología en V.....	44
Ilustración 32. Sistemas y Subsistemas.....	45
Ilustración 33. Diseño dedo anular falange media.....	46
Ilustración 34. Diseño dedo anular falange proximal.....	46
Ilustración 35. Medición al actuador lineal.....	47
Ilustración 36. Plataforma de actuadores.....	48
Ilustración 37. Plataforma dedo pulgar.....	48
Ilustración 38. Diseño parte intermedia.....	49
Ilustración 39. Parte de conexión.....	50
Ilustración 40. Cronograma de actividades.....	51
Ilustración 41. Plano superior.....	56
Ilustración 42. Plano lateral.....	56
Ilustración 43. Proceso de elaboración.....	57
Ilustración 44. Proceso de impresión parte intermedia.....	58
Ilustración 45. Parte intermedia impresa.....	58

Ilustración 46. Prueba de tensión en plataforma de actuadores.....	60
Ilustración 47. Prueba de deformación en plataforma de actuadores.....	61
Ilustración 48. Factor de seguridad en plataforma de actuadores.....	61
Ilustración 49. Prueba de tensión en plataforma para actuador del pulgar.....	62
Ilustración 50. Prueba de deformación en plataforma para actuador del pulgar.....	63
Ilustración 51. Factor de seguridad en plataforma para actuador del pulgar.....	63
Ilustración 52. Prueba de desplazamiento en parte intermedia.....	64
Ilustración 53. Prueba de deformación en parte intermedia.....	64
Ilustración 54. Prueba de tensión en parte intermedia.....	65
Ilustración 55. Factor de seguridad de parte intermedia.....	65
Ilustración 56. Primera etapa programación.....	66
Ilustración 57. Segunda etapa programación.....	67
Ilustración 58. Tercera etapa programación.....	68
Ilustración 59. Cuarta etapa programación.....	69
Ilustración 60. Quinta etapa programación.....	70
Ilustración 61. Pseudo código.....	71
Ilustración 62. Integración sistema eléctrico.....	72
Ilustración 63. Modelo esquemático Proteus.....	73
Ilustración 64. Primer montaje del sistema electrónico.....	74
Ilustración 65. Carcasa de madera.....	74
Ilustración 66. Proceso de montaje sistema electrónico.....	75
Ilustración 67. Montaje final sistema electrónico.....	75
Ilustración 68. Ensamble partes falange media y proximal.....	76
Ilustración 69. Representación de ensamblaje.....	77
Ilustración 70. Ensamble plataforma dedo pulgar.....	77
Ilustración 71. Proceso montaje placa actuadores.....	78
Ilustración 72. Montaje prototipo.....	78
Ilustración 73. Prototipo final extendido.....	79
Ilustración 74. Prototipo final flexionado.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Desarrollo de exoesqueletos de mano en la última década.....	7
Tabla 2. Factores de riesgo de la artrosis de mano.....	13
Tabla 3. Intensidad del impacto sobre las articulaciones en distintas actividades deportivas.....	15
Tabla 4. Rango de movimiento en las articulaciones.....	28
Tabla 5. Ejercicios para la mano artrósica.....	31
Tabla 6. Primer parte del programa de ejercicios para personas con artrosis de mano.....	32
Tabla 7. Segunda parte del programa de ejercicios para personas con artrosis de mano.....	33
Tabla 8. Características físicas del PLA comercial.....	39
Tabla 9. Tabla de especificaciones Arduino Mega 2560.....	40
Tabla 10. Tabla de especificaciones Actuador lineal.....	41
Tabla 11. Tabla de especificaciones HiLetgo BTS7960 43.....	42
Tabla 12. Tabla de especificaciones fuente conmutada.....	43
Tabla 13. Mediciones antropométricas de los dedos de la mano.....	45
Tabla 14. Matriz metodológica.....	52
Tabla 15. Operacionalización de las variables.....	53
Tabla 16. Representación de las partes de sujeción.....	54

Tabla 17. Representación partes prototipo.....	55
Tabla 18. Propiedades del PLA.....	59
Tabla 19. Costos componentes electrónicos.....	80
Tabla 20. Costos materiales.....	80
Tabla 21. Costos materiales mecánicos.....	80
Tabla 22. Costo partes del prototipo.....	80
Tabla 23. Costo final del prototipo.....	81
Tabla 24. Concordancia de los segmentos de la tesis con la investigación.....	86

I. INTRODUCCIÓN

Entre las patologías que afectan a la población mundial se encuentra a la artrosis, la cual es una enfermedad que ataca principalmente a los adultos mayores y la cual les origina un déficit de capacidad motora. Esta se trata de un deterioro progresivo en las articulaciones, tales como pueden ser las rodillas, la cadera o los dedos, la cual causa deformación, genera rigidez y dolor a la persona afectada. La artrosis es una enfermedad degenerativa, por lo cual no tiene cura, pero se puede prevenir y retrasar un avance de la enfermedad. Esto puede llegar a evitar mayores problemas en el futuro, mejorar la calidad de vida al paciente y tratar de preservar el movimiento de los dedos.

Una de las maneras para contrarrestar esta enfermedad es por medio de la terapia física, la cual se realiza con el objetivo de que la articulación no pierda fuerza muscular ni el rango de movimiento de los dedos, la terapia incluye una secuencia de ejercicios los cuales han logrado mejorar la condición de los pacientes que presentan daños por artrosis si se realizan en el momento adecuado y de una manera correcta. Las personas que sufren de artrosis, a menudo, encuentran que sus articulaciones se vuelven rígidas y que sus músculos se debilitan. De igual manera, se debe tener en cuenta que estas personas experimentan una pérdida de movimiento en las articulaciones, de tal manera que se le dificulta actividades físicas como agarrar objetos o cerrar su mano.

La presente investigación tiene como objetivo crear un dispositivo médico de terapia física para pacientes que padecen de artrosis de mano; la investigación cuenta con el diseño y construcción de un exoesqueleto que pueda desarrollar los movimientos de extensión y flexión de la mano para que el dispositivo sea capaz de reproducir los ejercicios de terapia que son indicados para la artrosis, y de esta manera lograr ayudar al paciente por medio de una terapia efectiva. En el capítulo 2 se detallará el problema de investigación del proyecto. Durante el capítulo 3 se encontrarán los fundamentos teóricos de la investigación. En el capítulo 4 se detalla la metodología aplicada para el desarrollo de la investigación, en el capítulo 5 se encontrarán los resultados obtenidos en la investigación. Consecuentemente, en el capítulo 6 se

establecerán las conclusiones obtenidas con base en los resultados obtenidos. En el capítulo 7 se encontrarán las recomendaciones del proyecto, en donde se brindarán sugerencias para trabajos futuros. En el capítulo 8 se encontrará las áreas de aplicabilidad del proyecto y para finalizar en el capítulo 9 se detallará el trabajo futuro en relación con el proyecto de investigación.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se abordarán los siguientes temas, como los problemas que pueden existir en la simulación de las articulaciones de la mano para un exoesqueleto rehabilitador de la misma. Consecuentemente, se presentará la justificación de la necesidad de esta investigación, junto con las preguntas de investigación y los objetivos como alcance del proyecto.

2.1. PRECEDENTES DEL PROBLEMA

Es importante destacar que la artrosis representa uno de los principales problemas de salud a nivel mundial, esta enfermedad es más prevalente en países desarrollados, esto debido a factores como la obesidad o el aumento de la longevidad en la población.

Esta discapacidad afecta sobre todo a las articulaciones de carga y aquellas que tienen una mayor movilidad. La artrosis afecta a alrededor de 302 millones de personas a nivel global y es una de las causas principales de discapacidad (Kolasinski et al., 2020). Según la "Global Burden of Disease – GBD", el cual se encarga de estudiar la prevalencia, incidencia y los años de vida vividos con una discapacidad a causa de distintas enfermedades a nivel global; esta investigación se realizó en 195 países diferentes. La artrosis se encuentra entre las 30 enfermedades más comunes a nivel mundial en el 2016, teniendo un incremento en su prevalencia de un 30% desde el 2006 (*Global Burden of Disease (GBD 2019)*).

Los procesos de rehabilitación se realizan principalmente a través de terapias físicas. En la actualidad, con la inclusión de dispositivos robóticos, se ha logrado incrementar la precisión y la calidad en las terapias, logrando de esta manera una mejor reintegración de los pacientes a sus actividades diarias en el menor tiempo posible. Entre los problemas que se han observado en el desarrollo de dispositivos de rehabilitación son la determinación de las tareas de movimiento que se requiere que realice el dispositivo y determinar el diseño mecánico apropiado para que cumpla con las necesidades de las terapias a realizar por el paciente.

2.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La artrosis es una enfermedad que afecta las funciones motoras de la mano esto afecta la habilidad de los pacientes de realizar sus actividades diarias. Esta es una enfermedad degenerativa, la cual se caracteriza por la destrucción del cartílago hialino que recubre las superficies óseas. Comúnmente esta se localiza en la columna cervical y lumbar, en algunas articulaciones del hombro y en las de los dedos de la mano, la articulación de la raíz del pulgar, la rodilla y la cadera. Entre las enfermedades reumatológicas, la artrosis es la que tiene mayor prevalencia. Esta produce dolores y alteraciones de la función articular y esta puede ser tanto secundaria o primitiva.

2.3. JUSTIFICACIÓN

En términos generales la artrosis es la pérdida progresiva de cartílago articular, esta suele acompañarse de un proceso de reparación que incluye esclerosis ósea, formación de osteofitos, deformaciones articulares y procesos inflamatorios intercurrentes (Rojals, 2021). La Revista de la Sociedad Española del Dolor menciona que las estadísticas internacionales indican que unos 302 millones de personas sufren de artrosis a nivel mundial, siendo esta una de las afectaciones con mayor frecuencia para aquellas personas con discapacidad de destreza (Rojals, 2021). Según estadísticas del Instituto Nacional de Estadística la cantidad de personas con discapacidad de destreza: problemas para agarrar, levantar o cargar cosas son un total de 47,783.

Estadísticas españolas reflejan que el 50% de las personas mayores de 65 años padecen artrosis (López Trigo & Álamo González, 2018). En cuanto a estadísticas de rehabilitación las personas de hasta 18 años han recibido tratamiento de rehabilitación con un promedio de 0.70, los adultos de hasta 65 años están dentro del promedio nacional y aquellos adultos mayores de 65 años tienen escaso acceso a tratamiento de rehabilitación con un promedio de 0.16(Calvo et al., 2002).

Por lo tanto, al tomar estas estadísticas como precedente se puede percibir que las personas mayores a 65 años tienen un índice bajo en cuanto a la obtención de terapias de rehabilitación. Cabe resaltar que esto puede atribuirse a problemas de acceso, lo cual indica que el prototipo de exoesqueleto rehabilitador de mano orientado a personas con artrosis podría ser

una herramienta accesible para personas de edad avanzada solventando la falta de rehabilitación para estos pacientes.

2.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

2.4.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN GENERAL

- ¿Se puede desarrollar un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano para personas afectadas por artrosis?

2.4.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN ESPECÍFICAS

- ¿Qué materiales pueden ser utilizados en el desarrollo de un prototipo de exoesqueleto de mano?
- ¿Podría lograrse la fabricación de un prototipo exoesqueleto de mano rehabilitador para pacientes con mano artrósica con los materiales disponibles en métodos actuales de impresión 3D?
- ¿Qué diseño de exoesqueleto de mano impreso 3D permitiría la realización de ejercicios para rehabilitación para el tratamiento de artrosis de mano?
- ¿Es posible fabricar un prototipo de exoesqueleto de mano que sea útil para ejercicios de rehabilitación física?

2.5. OBJETIVOS

2.5.1. OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano para personas afectadas por artrosis.

2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Indagar sobre los materiales disponibles que influirían en la manufactura de un prototipo de exoesqueleto de rehabilitación para personas afectadas por artrosis.
- Valorar los resultados obtenidos sobre los distintos materiales disponibles para la fabricación del prototipo para el tratamiento de artrosis.

- Formular una alternativa de diseño que permita al prototipo propuesto cumplir con las rutinas de ejercicios de rehabilitación para mano artrósica.
- Fabricar un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano que permita la ejecución de ejercicios de rehabilitación física.

III. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordarán todos aquellos aspectos teóricos relevantes que soportan el desarrollo de un prototipo de exoesqueleto de mano para personas con artrosis.

3.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

3.1.1. FABRICACIÓN DE EXOESQUELETOS PARA REHABILITACIÓN DE MANO EN EL MUNDO

Esta sección describirá distintos métodos en el desarrollo de exoesqueletos del miembro superior, especialmente de la mano. En la actualidad, existen diferentes tipos de exoesqueletos para rehabilitación de mano los cuales se discutirán a detalle, especialmente los sensores que fueron utilizados en su desarrollo y el sistema de control que los ejecuta. A continuación, se clasifican los exoesqueletos desarrollados agrupados por año de publicación, función, accionamiento y señal de control (Tabla 1).

Tabla 1. Desarrollo de exoesqueletos de mano en la última década.

AÑO	NOMBRE DEL DISPOSITIVO	FUNCIÓN	ACCIONAMIENTO	SEÑAL DE CONTROL
2010	HANDEXOS	Rehabilitación	Tendón, cable	Interruptor de gatillo
2011	HEXOSYS-11	Asistencia	Direct drive	-
2012	SEM Glove	Rehabilitación	Cable Bowden	Control por fuerza
2013	UoA	Rehabilitación /Asistencia	Neumática, cables de tendón	Fuerza, posicionamiento
2014	RML Glove	Háptico	Cable	Fuerza de entrada, posicionamiento de salida
2015	Exo-Glove	Asistencia	Tendón, cable	Movimiento de muñeca
2016	Exok'ab	Rehabilitación	Direct drive	Control por fuerza, posicionamiento
2017	Abdallah	Rehabilitación	Cables de enlace	EMG
2018	ReHand	Rehabilitación	Motor DC, varillaje deslizante	EMG, control por voz
2019	HX-β	Rehabilitación	Cable bowden, actuador serial elástico	Posicionamiento, control por torque
2020	RELab tenoexo	Asistencia	Varillaje de resorte, cable bowden	EMG

Fuente: (Tiaan du Plessis, Karim Djouan y Christiaan Oosthuizen, 2021)

Durante este periodo de 10 años han existido grandes avances en el desarrollo de exoesqueletos para rehabilitación de mano, en donde se han tenido diferentes enfoques en la función de estos dispositivos, el cual se puede basar en la rehabilitación de las funciones motoras de la mano o en la asistencia para el movimiento de la mano. De este modo, los exoesqueletos de rehabilitación han demostrado brindar una rehabilitación o asistencia adecuada para la recuperación de los pacientes.

Es importante señalar que la documentación acerca del desarrollo de exoesqueletos de mano es reciente, por lo cual, aun hoy en día se realizan grandes avances en la implementación de nuevos métodos o estrategias para brindar un dispositivo óptimo. A continuación, se muestran algunas de los dispositivos recientes que funcionan como herramienta de rehabilitación.

El propósito del exoesqueleto ReLab tenoexo es brindar una rehabilitación a pacientes que han sufrido de una discapacidad en las funciones motoras de las manos, ayudándoles con los movimientos de flexión y extensión de los dedos, así mismo para agarrar objetos o terapias controladas (Ilustración 1). Este exoesqueleto tiene la capacidad de realizar múltiples patrones de agarre, controlado por voz o por medio de accionamiento de botones.



Ilustración 1. Exoesqueleto ReLab tenoexo.

Fuente: (ETH Zurich, 2020)

Wang presenta un diseño de exoesqueleto portátil para rehabilitación (Ilustración 2). Su diseño es de peso ligero, portátil, de larga resistencia y ajustable a distintos usuarios. El exoesqueleto de mano puede accionar los dedos y el pulgar de manera independiente. Los cuatro dedos son accionados al mismo tiempo por un solenoide. De igual manera, este dispositivo se controla a través de EMG y cuenta con un sistema de control de voz, esto facilita de gran manera las terapias de rehabilitación que realiza el paciente debido a que no requiere de accionar ningún tipo de botón para que el exoesqueleto empiece a funcionar de manera adecuada, por lo cual, lo convierte en una opción viable para ser utilizado en terapias de rehabilitación de mano.

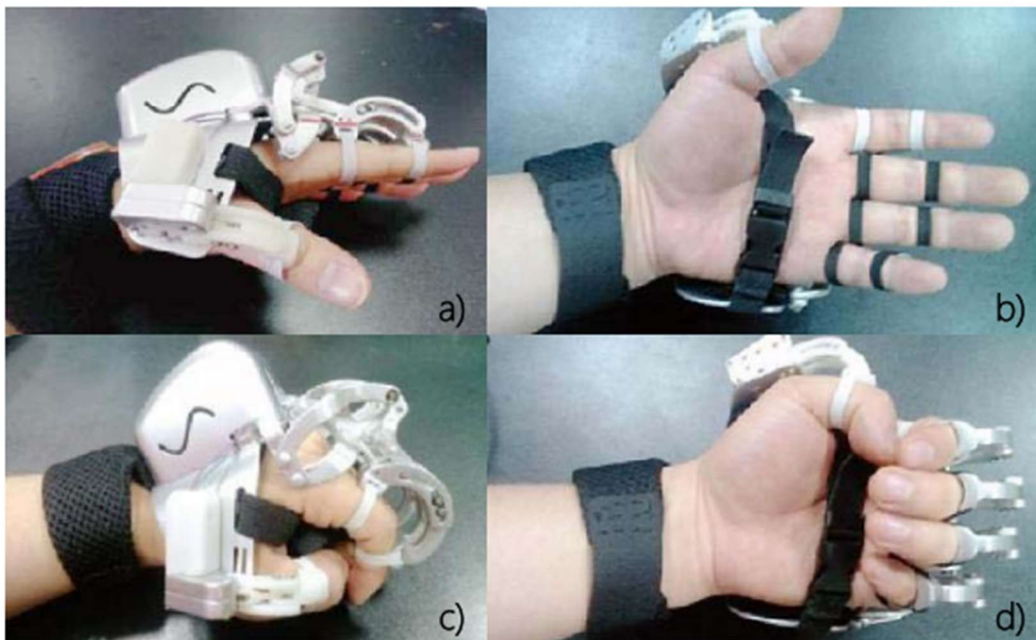


Ilustración 2. Exoesqueleto ReHand en diferentes posiciones. a) Mano extendida; b) Vista palmar; c) Mano flexionada; d) Vista palmar flexionada.

Fuente: (Duojin Wang, 2018)

3.1.2. ACCIONAMIENTO DE EXOSQUELETOS DE MANO

Se han explorado distintos métodos de accionamiento a lo largo de los años en el desarrollo de exoesqueletos de mano. Se han establecido diseños pasivos y activos (Ilustración 3). Los sistemas pasivos cuentan con resortes restauradores, en relación con los sistemas activos los cuales cuentan con motores eléctricos, neumática, actuadores elásticos en serie o actuadores lineales. A continuación, se brindan las características de cada uno de estos métodos de accionamiento (Tiaan du Plessis, Karim Djouan y Christiaan Oosthuizen, 2021):

1. Sistemas pasivos. Un sistema pasivo usualmente incluye partes las cuales almacenan energía potencial (resortes o cualquier material elástico) y puede funcionar sin la necesidad de una fuente de energía externa. Este tipo de sistema fue diseñado con el objetivo principal de ayudar al paciente en las últimas etapas de entrenamiento para fortalecer sus habilidades motoras y los músculos de la mano por medio de su utilización en terapias de rehabilitación motora.

2. Sistemas activos. Los sistemas activos son utilizados con frecuencia para el accionamiento de los exoesqueletos de mano. Estos sistemas cuentan con motores para su accionamiento, entre ellos se encuentran motores DC, motores DC sin escobilla, actuadores lineales y servomotores. Los motores DC son conocidos por su simplicidad, fácil control y bajo costo. Los actuadores lineales son motores DC conectados a un conjunto de tornillos de avance para convertir el movimiento de rotación del motor en movimiento lineal. El sistema puede “empujar” o “tirar” para flexionar o extender los dedos de la mano según el diseño propuesto.

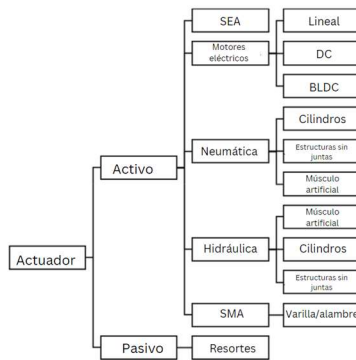


Ilustración 3. Métodos de accionamiento.

Fuente: (Tiaan du Plessis, Karim Djouan y Christiaan Oosthuizen, 2021)

3.2 ARTROSIS

La artrosis es una enfermedad multifactorial de etiología incierta que afecta al cartílago de las articulaciones diartrodiales. Esta es una condición común la cual ha afectado al menos a un 30% de las personas adultas. Como consecuencia de la artrosis se ve afectada la biomecánica de las articulaciones lo cual termina en dolor, disminución de la movilidad y deformidad. Hay distintos factores que juegan un papel en la patogenia de esta condición, entre los cuales se incluyen la edad, factores genéticos, trauma, obesidad e inflamación, los cuales contribuyen a alterar la estructura del cartílago, el hueso subcondral y la membrana sinovial, llevando a los cambios que caracterizan a la artrosis (*Patogénesis de La Artrosis | Elsevier Enhanced Reader, 2017*)

En resumen, La artrosis es una enfermedad multifactorial de etiología incierta que afecta al cartílago de las articulaciones diartrodiales. Esta es una condición común la cual ha afectado al menos a un 30% de las personas adultas. Como consecuencia de la artrosis se ve afectada la biomecánica de las articulaciones lo cual termina en dolor, disminución de la movilidad y deformidad

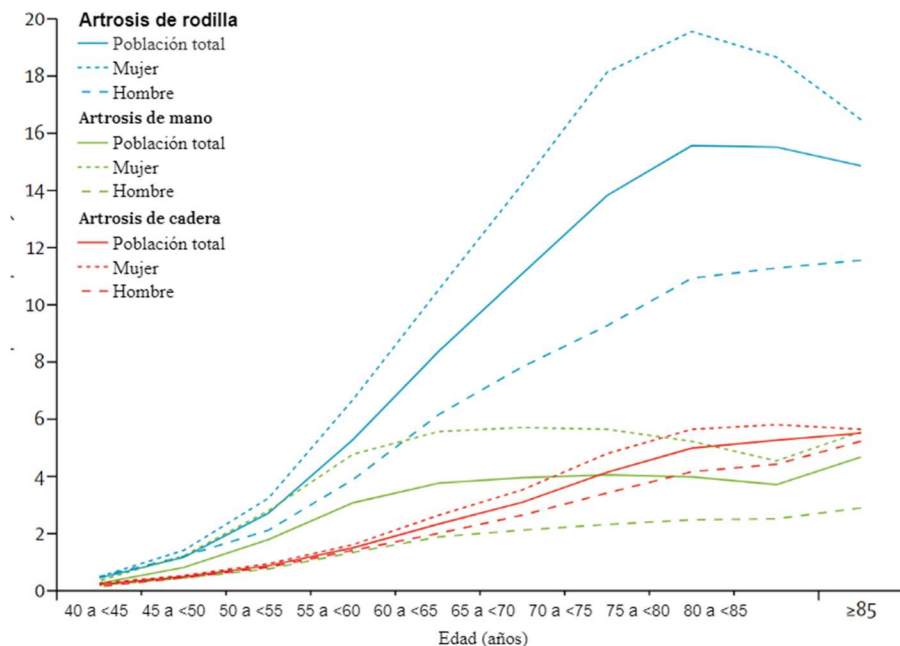


Ilustración 4. Incidencia por 100 años-persona.

Fuente: (The Lancet, 2019)

La artrosis de las articulaciones de las manos se produce usualmente por un desgaste del cartílago de estas articulaciones. Suele producir dolor, rigidez, dificultad para mover los dedos y deformidad. Esta discapacidad da inicio habitualmente se encuentra entre los 40 y 50 años, aunque de igual manera puede haber comienzos tardíos. Es más frecuente en mujeres, aunque se presenta de igual manera en los hombres. Las articulaciones que afectan son (Ilustración 5):

- Articulación interfalángica distal (círculo verde oscuro).
- Articulación interfalángica proximal (círculo verde claro).
- Articulación metacarpofalángica (círculo azul oscuro).
- Articulación trapecio-metacarpiana (círculo azul claro).



Ilustración 5. Articulaciones afectadas por artrosis de mano.

Fuente: (Sociedad Española de Reumatología, 2016)

3.2.1. FACTORES DE RIESGO

Los factores de riesgo de la artrosis se pueden llegar a clasificar en dos grupos: los factores individuales y articulares, los cuales a su vez pueden interactuar de forma compleja. Estos dos grupos contienen distintos factores que afectan de distintas formas como afectará la artrosis al paciente (Tabla 2).

Tabla 2. Factores de riesgo de la artrosis de mano.

	ARTROSIS DE MANO
FACTORES INDIVIDUALES	<ul style="list-style-type: none">• Edad avanzada• Sexo femenino• Etnia• Obesidad• Comorbilidades• Herencia
FACTORES ARTICULARES	<ul style="list-style-type: none">• Poliartrosis• Tareas que requieren una destreza manual considerable

Fuente: (Wieczorek, 2017)

3.2.2.1. Factores individuales

Los factores de riesgo individuales son aquellos que dependen de la persona, de sus características individuales. Según Wieczork, se encuentran los siguientes:

- **Edad.** La edad es el principal factor de riesgo en las personas que sufren de artrosis. La prevalencia y la incidencia de la artrosis radiológica aumentan de manera considerable con la edad.
- **Sexo.** El género femenino se asocia a una mayor prevalencia y gravedad de artrosis, en particular de la artrosis de rodilla.
- **Etnia.** La prevalencia de la artrosis varía entre los grupos étnicos. La artrosis de mano es menos prevalente en personas asiáticas que en las personas caucásicas.
- **Obesidad.** Se ha demostrado que el sobrepeso es un factor de riesgo para personas que sufren

de artrosis de rodilla. La artrosis se ve favorecida por los efectos inflamatorios sistémicos de la obesidad.

- Comorbilidades. Se ha demostrado que factores metabólicos como puede ser la diabetes de tipo 2 o una alta glucemia se puede asociar al desarrollo y progresión de la artrosis. Una inflamación sistémica de bajo grado, resultante de acumulación de glucosa, se puede contribuir a crear un ambiente adverso, facilitando de esta manera el desarrollo de la artrosis.
- Genética y genómica. Diferentes estudios han demostrado que familiares y sobre todo gemelos resaltan el componente hereditario del riesgo de artrosis. Los factores genéticos explicarían el 60% de la artrosis de mano y caderas, y el 40% de la artrosis de rodilla.

3.2.2.2. Factores articulares

Los factores articulares son aquellos que dependen de las actividades que realiza cada una de las personas, entre ellos se conocen los siguientes (Wieczorek, 2017):

- Poliartrosis. El número de articulaciones que se ve afectadas por la artrosis es un factor de riesgo de artrosis en otra articulación.
- Actividad física. La actividad física es beneficiosa debido que refuerza los músculos periarticulares y ayuda de esta manera a estabilizar la articulación.
- Riesgos profesionales. Existe una influencia de las tareas profesionales en la aparición de artrosis. Posiciones arrodilladas o en cuclillas prolongadas y repetidas pueden desarrollar artrosis de rodilla.

Tabla 3. Intensidad del impacto sobre las articulaciones en distintas actividades deportivas.

BAJO NIVEL DE IMPACTO ARTICULAR	NIVEL MEDIO DE IMPACTO ARTICULAR	ALTO NIVEL DE IMPACTO ARTICULAR
<ul style="list-style-type: none"> • NATACIÓN • BICICLETA FIJA • CAMINATA • GIMNASIA SUAVE • AÉROBICOS ACUÁTICOS • ESQUÍ ALPINO 	<ul style="list-style-type: none"> • Bolos • Ciclismo • Esgrima • Remo • Patinaje • Escalada • Tenis en dobles • Musculación • Navegación a vela • Caminata a paso ligero • Tenis de mesa • Canoa kayak • Senderismo • Rollers • Esquí de fondo • Equitación 	<ul style="list-style-type: none"> • Baloncesto • Vóley • Handbol • Carrera a pie • Futbol • Rugby • Tenis • Squash • Esquí alpino (competición)

Fuente: (Wieczorek, 2017)

3.2.2. TIPOS DE ARTROSIS DE MANO

Es habitual que una misma persona tenga artrosis en varias de estas articulaciones. Entre los tipos de artrosis de mano que existen, se encuentran los siguientes:

1. Artrosis de las interfalángicas distales. Es una de las localizaciones más típicas y frecuentes de la artrosis de mano (Ilustración 6). Esta tiene un fuerte carácter hereditario, especialmente en mujeres de mediana edad. Los pacientes con este tipo de artrosis notan un engrosamiento lento y progresivo en las articulaciones interfalángicas distales hasta forma los denominados nódulos de Heberden, los cuales consisten en la tumefacción y deformidad en la articulación interfalángica distal.



Ilustración 6. Artrosis de las interfalángicas distales.

Fuente: (Sociedad Española de Reumatología, 2016)

Las deformaciones que la artrosis genera en los dedos índice y medio. Los nudulos de Heberden son inicialmente únicos, pero a medida pasa el tiempo estos pueden aparecer en otros dedos. Sobre todo, al inicio puede que exista inflamación en la zona con dolor y enrojecimiento. Con el tiempo esta deformación en los dedos permanece, pero si puede existir una mejoría en las molestias, las cuales pueden desaparecer o volverse tolerables, aunque pueden incrementar según el esfuerzo que se realice.

2. Artrosis de interfalángicas proximales. Esta suele aparecer asociada a la artrosis de las interfalángicas distales, aunque esta localización es menos frecuente y suele ocurrir en mujeres de mediana edad. Las deformaciones y tumefacciones de estas articulaciones se conocen como nudulos de Bouchard (Ilustración 7).

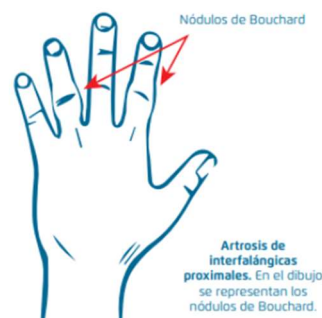


Ilustración 7. Artrosis de interfalángicas proximales.

Fuente: (Sociedad Española de Reumatología, 2016)

A diferencia de la artrosis de las interfalángicas distales se observan las deformidades en los dedos generadas por la artrosis de interfalángicas proximales y la ubicación de los nódulos de Bouchard en el dedo anular e índice. Al igual que ocurre en la artrosis de interfalángicas distales, se produce inflamación y deformidad en varios de los dedos de las manos, aunque en el caso de este tipo de artrosis, el dolor, la inflamación y la destrucción de la articulación suele ser mayor.

3. Artrosis de metacarpofalángicas. También es conocida como artrosis de Missouri. Es poco habitual, y suele desarrollarse en personas que han ejercido bastantes trabajos manuales a lo largo de sus vidas.
4. Artrosis de trapecio metacarpiana. También conocida como rizartrrosis o artrosis de pulgar. Es más habitual en mujeres de mediana edad, y suele aparecer en las dos manos, aunque el dolor se habitualmente es mayor en una mano que en la otra. En casos avanzados se pueden observar deformidades cerca de la muñeca y el dolor es mayor al realizar movimientos de la pinza con el pulgar. En ocasiones, aparece intenso dolor e inflamación, el cual no se alivia ni con el reposo.

3.2.3. PREVALENCIA E INCIDENCIA

Las consecuencias de esta afección en el plano socioeconómico son numerosas, con una fuerte repercusión económica en vista que provocan costes directos (consultas, tratamiento, intervenciones hospitalarias, pruebas complementarias y hospitalizaciones) e indirectos (jubilación anticipada, pérdida de productividad, pérdida de empleo y paro por enfermedad), pero también tiene una gran influencia en la calidad de vida de las personas. En la población general la lesión de las manos es frecuente (Saraux & Le Nen, 2009).

La prevalencia radiológica se calcula en torno al 10% en la franja etaria de los 40-49 años, con una elevación rápida del índice de prevalencia con la edad, debido a que, después de los 70 años, se le estima en un 90% en la población femenina y en un 80% en la población masculina. Para la artrosis sintomática de la mano en personas mayores de 65 años, Mannoni señala una prevalencia del orden de un 14,9% (Mannoni et al., 2003).

3.3. ANATOMÍA DE LA MANO

La anatomía de la mano integra uno de los elementos más complejos del cuerpo humano. Los estudios acerca de la mano datan de los tiempos prehistóricos y el cual, por su importancia en las actividades cotidianas, continuamente se han descrito múltiples hallazgos por parte de anatomistas, cirujanos, e incluso artistas que configuraron lo que actualmente se conoce como la estructura de la mano (*Mano | Anatomía macroscópica. Un panorama general, 2e | Access Medicina | McGraw Hill Medical, 2022*).

La mano es una parte del cuerpo la cual se encuentra unida al antebrazo, la cual se extiende desde la muñeca hasta la parte final de los dedos, está formada por numerosos huesos los cuales en conjunto forman la palma de la mano y otro conjunto de huesos que definen los dedos. Esta cuenta con un total de 27 huesos, 8 en el capo, 5 metacarpianos y 14 falanges. Estos huesos en conjunto constituyen las 4 principales articulaciones de la mano, las cuales se conocen como (Ilustración 8): Articulación Interfalángica Distal (IFD), Articulación Interfalángica Proximal (IFP), Articulación Metacarpofalángica (MCF) y Articulación Carpometacarpiana (CMC).



Ilustración 8. Ligamentos y articulaciones de la mano.

Fuente: (*Mano | Anatomía macroscópica. Un panorama general, 2e | Access Medicina | McGraw Hill Medical, 2022*)

La muñeca o carpo, es la articulación la cual une los huesos del radio y cúbito al carpo, entre otras palabras, este es el nexo entre el antebrazo y la mano. La articulación de la muñeca es anatómicamente una de las más complejas del sistema musculoesquelético entre sus estructuras óseas, musculares, tendinosas y ligamentosas. Está compuesta por 10 huesos, entre ellos encontramos los siguientes: radio, cúbito, escafoides, semilunar, piramidal, pisiforme, ganchoso, grande, trapezoide y trapecio. De igual manera, está conformada por 4 articulaciones las cuales trabajan en conjunto para posibilitar los movimientos de flexión, extensión, aducción o abducción los cuales son utilizados en las actividades de cada día.

La muñeca cuenta con seis compartimientos (Ilustración 9) que dividen el dorso de la muñeca, el primer compartimiento contiene los músculos abductores largo del pulgar y extensor corto del pulgar, el segundo incluye los músculos extensor radial largo del carpo y extensor radial corto del carpo, el tercero contiene el musculo extensor largo del pulgar, el cuarto incluye los músculos extensor común de los dedos y extensor del índice, el quinto contiene el musculo extensor propio del quinto dedo y por último, el sexto contiene el músculo extensor cubital del carpo.

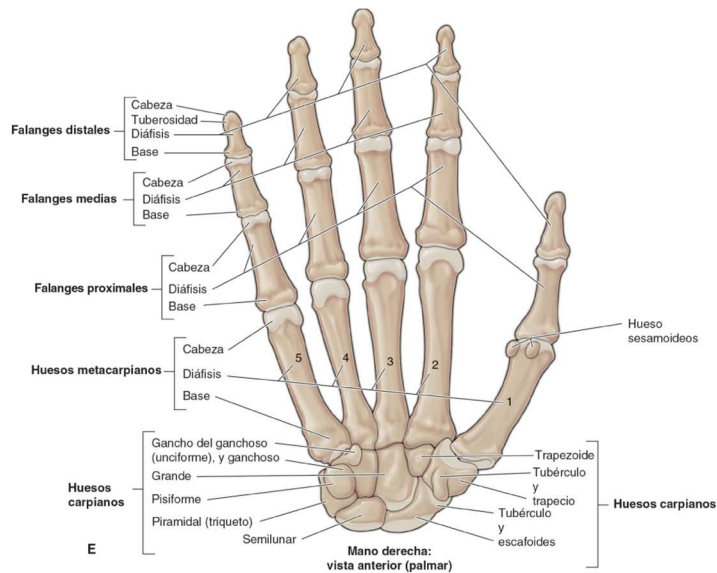


Ilustración 9. Huesos de la mano humana.

Fuente: (Mano | *Anatomía macroscópica. Un panorama general, 2e* | Access Medicina | McGraw Hill Medical, 2022)

3.3.1. ACCIONES DE LOS DEDOS

Las articulaciones de los dedos de la mano y los movimientos asociados con la biomecánica de los dedos son (Ilustración 10):

- Articulaciones carpometacarpianas. Articulaciones deslizantes las cuales permiten el deslizamiento y la rotación.
- Articulaciones metacarpofalángicas. Articulaciones condilares que posibilitan la flexión, extensión, abducción y aducción.
- Flexión y extensión. Movimiento del metacarpiana hacia la palma de la mano (flexión) y para separarlo de la palma (extensión).
- Abducción y aducción. La abducción es el movimiento que aleja los dedos del dedo medio; la aducción, contrario a la abducción, consiste en el movimiento de los dedos hacia el dedo medio.
- Articulaciones interfalángicas. Articulaciones de bisagra que facilitan la flexión y extensión; existe una articulación interfalángica proximal y una articulación interfalángica distal.

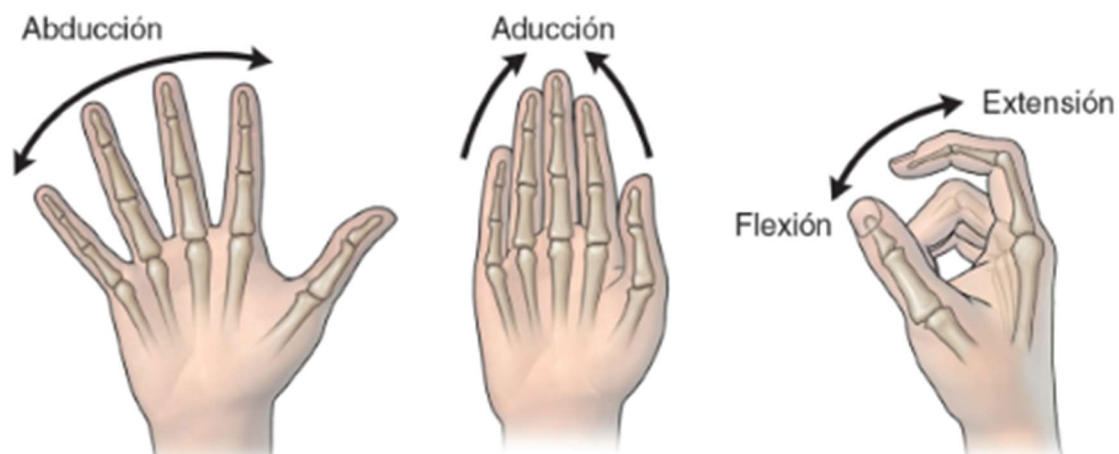


Ilustración 10. Acciones de los dedos de la mano.

Fuente: (Mano | Anatomía macroscópica. Un panorama general, 2e | Access Medicina | McGraw Hill Medical, 2022)

3.3.2. ACCIONES DEL PULGAR

Las articulaciones del pulgar de la mano y los movimientos asociados con la biomecánica del pulgar son:

- Articulación carpometacarpiana. Articulación en silla de montar la cual permite los movimientos de oposición y reposición.
- Articulación metacarpofalángica. Articulación de bisagra que permite los movimientos de flexión y extensión.
- Articulación interfalángica. Articulación de bisagra que permite la flexión y extensión para el dedo pulgar.

El pulgar se encuentra rotado 90 grados con respecto a los demás dedos de la mano; por lo cual, la abducción y aducción acontecen en el plano sagital, y la flexión y la extensión, en el plano coronal. Cada una de las acciones del dedo pulgar (Ilustración 11) facilitan diferentes tipos de tareas de las personas en sus actividades cotidianas y de igual manera son utilizadas en diferentes tipos de terapias de rehabilitación.



Ilustración 11. Acciones del dedo pulgar.

Fuente: (Mano | Anatomía macroscópica. Un panorama general, 2e | Access Medicina | McGraw Hill Medical, 2022)

3.4. RANGO DE MOVILIDAD DE LA MANO

El rango de movilidad de la mano se mide desde cada una de las articulaciones de las manos para determinar el ángulo de flexión y extensión que logran desarrollar las mismas a través de los movimientos habituales de los dedos y de la mano en general. Entre los movimientos habituales que encontramos son los siguientes:

- Flexión.
- Extensión.
- Desviación radial.
- Desviación Cubital.

3.4.1. RANGO DE MOVILIDAD DE LA MUÑECA

La flexión habitual que presenta la muñeca cuenta con una desviación de 80 grados aproximadamente desde la posición neutra de 0 grados. El arco usual de extensión se encuentra en 70 grados, mientras que la desviación cubital cuenta con un arco aproximado de 30 grados y su desviación radial es de 20 grados aproximadamente (Ilustración 12).

La desviación cubital es una desviación de la mano hacia el lado del quinto dedo y la desviación radial hacia el lado del dedo pulgar. Estas se producen cuando la mano pierde su alineamiento con el antebrazo desviándose hasta la izquierda o derecha más allá del rango medio de movimiento de la mano.

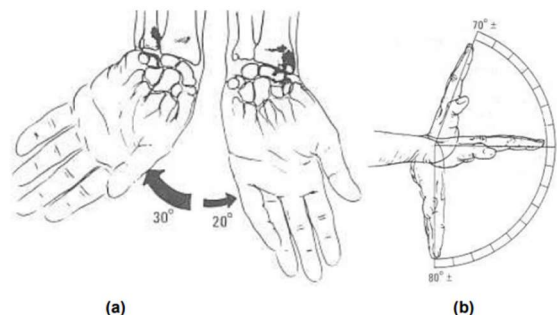


Ilustración 12. Rango de movilidad de la muñeca: a) Desviación Cubital y Radial, b) flexión y extensión.

Fuente: (CARACTERIZACIÓN CINEMATICA DE LA MANO. - CINEMÁTICA DE LA MANO, 2007)

3.4.2. RANGO DE MOVILIDAD DE LOS DEDOS

El rango de movilidad de los dedos se mide en término del grado máximo de flexión de los dedos hasta el grado máximo de extensión de estos, la hiperextensión de los dedos puede ser medida con ángulo negativo, por lo cual el rango total del movimiento de cada uno de los dedos se determinará restando el ángulo de extensión del ángulo de flexión (Tabla 4). Regularmente la abducción y aducción de los dedos no son medidas, pero estas se identifican para poder determinar la función de los músculos interóseos de la mano. El movimiento de la articulación carpometacarpiana del pulgar se encuentra definida por la abducción radial y palmar, de igual manera de la oposición y retro posición del pulgar en donde destacan los siguientes movimientos:

- Extensión y flexión de los dedos a la altura de las articulaciones metacarpofalángicas.
- Extensión y flexión de los dedos a la altura de las articulaciones interfalángicas.
- Abducción y aducción de los dedos a la altura de las articulaciones metacarpofalángicas.
- Extensión y flexión de pulgar a la altura de la articulación metacarpofalángica y de la articulación interfalángica (abducción radial y abducción transpalmar).
- Abducción y aducción del pulgar a nivel de la articulación carpometacarpiana (abducción palmar).
- Oposición.

La flexión normal de los dedos, estos se encuentran juntos en movimiento continuo y tocan la palma al nivel del surco palmar distal (Ilustraciones 13, 14 y 15).

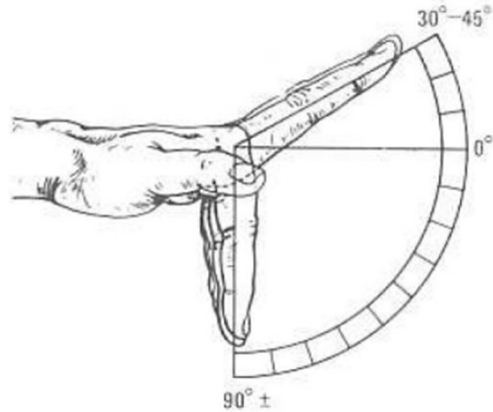


Ilustración 13. Arcos de movilidad de la articulación metacarpofalángica: flexión y extensión.

Fuente: (CARACTERIZACIÓN CINEMATICA DE LA MANO. - CINEMÁTICA DE LA MANO, 2007)

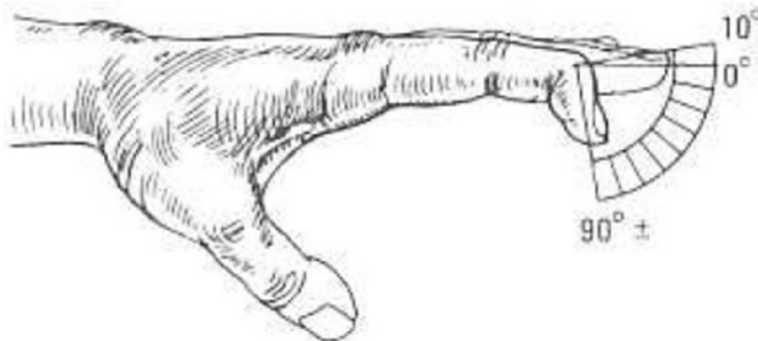


Ilustración 14. Arcos de movilidad de la articulación interfalángica distal: flexión y extensión.

Fuente: (CARACTERIZACIÓN CINEMATICA DE LA MANO. - CINEMÁTICA DE LA MANO, 2007)

En la extensión habitual los dedos se mueven conjuntamente y se extiendan hasta la posición recta.

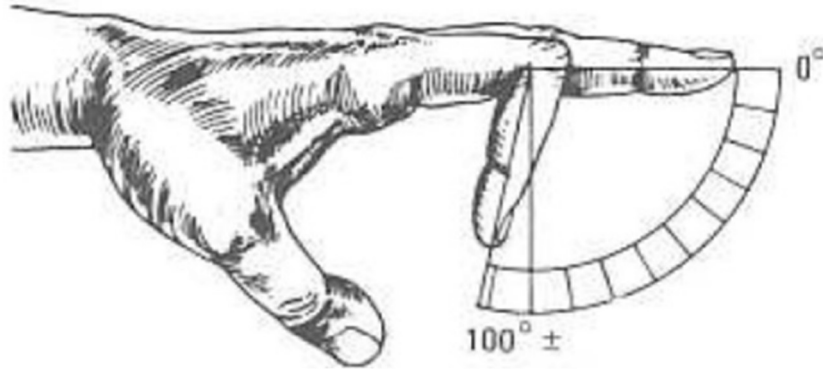


Ilustración 15. Arcos de la movilidad de la articulación interfalángica proximal: flexión y extensión.

Fuente: (CARACTERIZACIÓN CINEMATICA DE LA MANO. - CINEMÁTICA DE LA MANO, 2007)

Por otra parte, la abducción y la aducción se miden a partir de la línea axial de la mano, todos los dedos son separados por arcos de aproximadamente 20 grados, mientras que en la aducción se tocan entre sí (Ilustración 16).

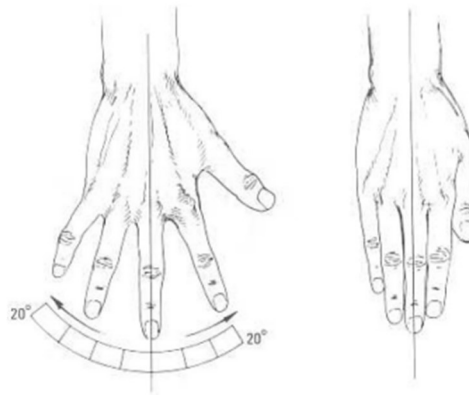


Ilustración 16. Abducción y aducción de los dedos.

Fuente: (CARACTERIZACIÓN CINEMATICA DE LA MANO. - CINEMÁTICA DE LA MANO, 2007)

3.4.3. FLEXIÓN Y EXTENSIÓN DEL PULGAR.

La flexión y extensión del pulgar se puede identificar cuando se intenta tocar la base del dedo meñique, por medio de este movimiento de aducción transpalmar se puede observar la flexión activa de las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas del pulgar (Ilustración 17).

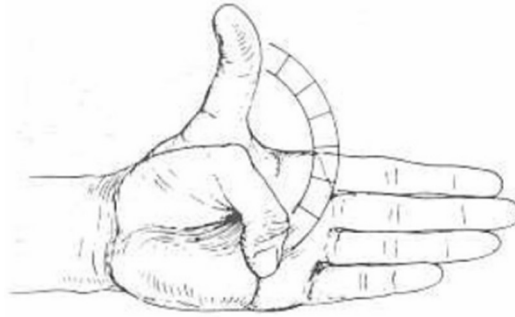


Ilustración 17. Abducción transpalmar del pulgar.

Fuente: (CARACTERIZACIÓN CINEMATICA DE LA MANO. - CINEMÁTICA DE LA MANO, 2007)

La flexión y extensión de la articulación metacarpofalángica del pulgar cuenta con un arco de movilidad de cerca de 50 grados entre el dedo pulgar y el índice, mientras que la articulación interfalángica de 90 grados y -20 grados respecto a la línea axial del dedo pulgar (ilustración 18 y 19).

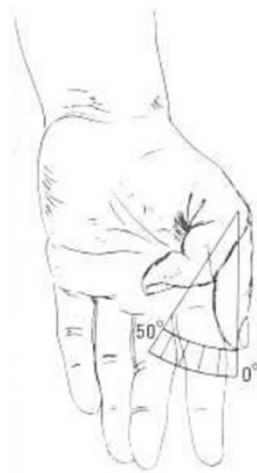


Ilustración 18. Flexión y extensión del pulgar: Articulación Metacarpofalángica.

Fuente: (CARACTERIZACIÓN CINEMATICA DE LA MANO. - CINEMÁTICA DE LA MANO, 2007)

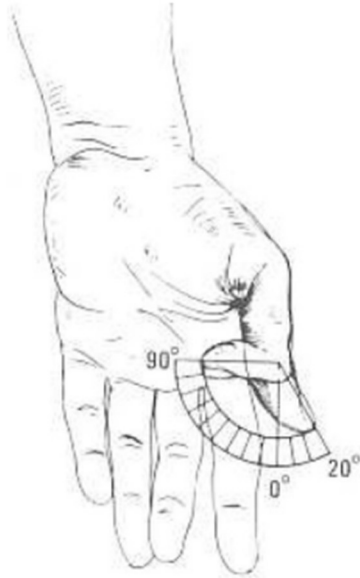


Ilustración 19. Flexión y extensión del pulgar: Articulación Interfalángica.

Fuente: (CARACTERIZACIÓN CINEMATICA DE LA MANO. - CINEMÁTICA DE LA MANO, 2007)

La abducción total se forma cuando el dedo índice y pulgar forman un ángulo de 70 grados aproximadamente (Ilustración 20). El regreso del pulgar hasta la palma representa una abducción completa, con lo que el dedo pulgar es capaz de realizar un movimiento de oposición al intentar tocar la punta del dedo meñique.

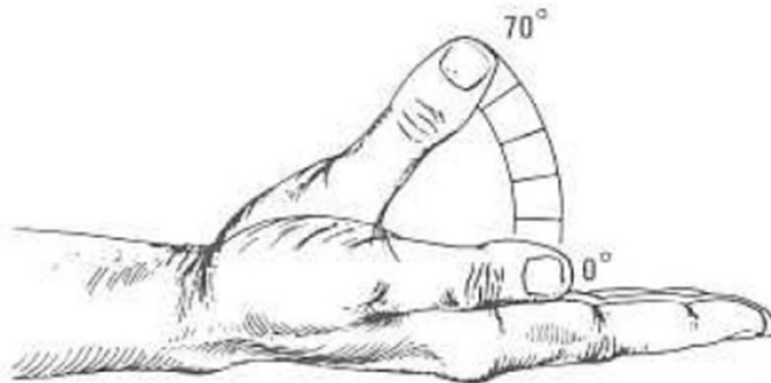


Ilustración 20. Abducción y aducción palmar del pulgar.

Fuente: (CARACTERIZACIÓN CINEMATICA DE LA MANO. - CINEMÁTICA DE LA MANO, 2007)

De manera conjunta los dedos de la mano presentan un rango de movilidad promedio, por otra parte, de manera de forma individual presentan un rango de movilidad que varía de un dedo a otro, por ejemplo, la articulación metacarpofalángica del dedo índice cuenta con un rango de movilidad de 70 grados y la articulación metacarpofalángica del dedo meñique un rango de 95 grados. Los rangos de movilidad de la abducción y aducción del dedo índice, es de aproximadamente 60 grados, 45 grados para el dedo medio y de 50 grados para el dedo meñique.

Tabla 4. Rango de movimiento en las articulaciones

ARTICULACIONES	RANGO DE MOVIMIENTO
MUÑECA	Flexión: 0 °-80 ° Extensión: 0 °-60 ° Radial: 0 °-20 ° Cubital: 0 °-40 °
ARTICULACIÓN METACARPOFALÁNGICA DE LOS DEDOS	Hiperextensión: 0 °-45 ° Flexión: 0 °-90 °
ARTICULACIÓN INTERFALÁNGICA PROXIMAL DE LOS DEDOS	Extensión: 0 ° Flexión: 0 °-100 °
ARTICULACIÓN INTERFALÁNGICA DISTAL DE LOS DEDOS	Extensión: 0 °-10 ° Flexión: 0 °-90 °
ARTICULACIÓN METACARPOFALÁNGICA DEL PULGAR	Hiperextensión: 0 °-10 ° Flexión: 0 °-50 °
ARTICULACIÓN INTERFALÁNGICA DEL PULGAR	Hiperextensión: 0 °-20 ° Flexión: 0 °-90 °
ARTICULACIÓN CARPOMETACARPIANA DEL PULGAR	Aducción palmar: 0 ° Abducción palmar: 0 °-45 ° Aducción radial: 0 ° Abducción radial: 0 °-60 °

Fuente: (CARACTERIZACIÓN CINEMATICA DE LA MANO. - CINEMÁTICA DE LA MANO, 2007)

3.5. TERAPIA DE REHABILITACIÓN

La terapia de rehabilitación es uno de los métodos planteados para la disminución de síntomas y signos de la artrosis. Las intervenciones terapéuticas de rehabilitación son de carácter paliativo ya que las mismas no tienen como fin curar la enfermedad, sin embargo, estas buscan mejorar la calidad de vida del paciente. Debido a esto, los pacientes con artrosis deben recibir un tratamiento continuo, personalizado y periódico. Como objetivo general la fisioterapia para mano con artrosis es conservar o aumentar la capacidad funcional, de este derivan los siguientes objetivos específicos:

- Reducir el dolor.
- Prevenir la sobrecarga articular.
- Conservar la estabilidad articular.
- Impedir la atrofia muscular y otros problemas del músculo.
- Evitar el avance y desarrollo de las deformidades.
- Promover el rendimiento en el trabajo y las actividades de ocio.
- Lograr la máxima autonomía en las actividades de la vida diaria.

Algunos de los métodos utilizados para el tratamiento de artrosis de mano son los siguientes: termoterapia, electroterapia, cinesiterapia y las fisioterapias que son el enfoque de esta investigación (Montull et al., 2004).

3.5.1. FISIOTERAPIA

Uno de los principales métodos de tratamiento para los pacientes con artrosis es la fisioterapia, esto según la World Confederation for Physical Therapy es un tipo de servicio que busca fomentar, conservar y restaurar el movimiento y la capacidad funcional de las personas. La fisioterapia es indicada a las personas que sufren en el rendimiento de su movimiento funcional, esto puede verse debilitado debido al envejecimiento, lesiones, dolor, enfermedades, trastornos y condiciones o factores ambientales. Una parte fundamental de lo que significa estar saludable (Physiotherapy, 2019).

En cuanto a porque debería tomarse en consideración para la fisioterapia como tratamiento de rehabilitación para artrosis de mano, esto es debido al impacto de gran beneficio que tienen los pacientes al ejercitar sus articulaciones afectadas. Al ejercitar las articulaciones se busca prevenir la pérdida de fuerza muscular y mantener el rango de movimiento de la mano el cual puede verse afectado debido a la patología.

Al presentar los ejercicios de fisioterapia para pacientes con artrosis se busca obtener los siguientes resultados:

- Aliviar el dolor.
- Desinflamar.
- Rehabilitar arcos de movimiento.
- Disminuir el desgaste muscular.
- Corregir la postura (Araujo Segura & Chirinos Rodríguez, 2017).

En caso de no tratar las lesiones causadas por la artrosis y no encontrarles cierto grado de rehabilitación a los pacientes, estos pueden presentar consecuencias negativas en su vida diaria. Esto debido a la falta de independencia que estos pueden llegar a sentir causado por las lesiones en sus manos. Algunos de los efectos negativos que puede presentar una persona con artrosis no tratada son: aburrimiento, frustración, enojo, aislamiento, incremento de la dependencia y sentimientos de inutilidad (Araujo Segura & Chirinos Rodríguez, 2017).

3.5.2. EJERCICIOS DE FISIOTERAPIA PARA MANO ARTRÓSICA

La creación de ejercicios para la rehabilitación física de la mano artrósica debe tomar en consideración la planeación de rutinas que permitan la mejora de las articulaciones afectadas en conexión con el rango articular, la fuerza muscular y la funcionalidad de la mano (Araujo Segura & Chirinos Rodríguez, 2017).

Para la rehabilitación de mano artrósica se han encontrado diferentes ejercicios empleados en estudios controlados. Estos ejercicios buscan la mejoría ocupacional de los pacientes y regresar las funcionalidades normales de estos. Los estudios fueron realizados en

plazos de 12 a 16 semanas, arrojando conclusiones variadas. Muchos de los ejercicios incluidos en las rutinas establecidas en estos estudios utilizan únicamente movimientos de la mano sin ayudas externas (Tablas 5,6 y 7).

Tabla 5. Ejercicios para la mano artrósica

TIPO DE EJERCICIO	DESCRIPCIÓN
SOBRE LA MESA	La mano y la muñeca permanecen en una posición neutral; el sujeto flexiona únicamente desde su segunda a quinta articulaciones metacarpofalángicas, y regresa a posición neutral.
PUÑO PEQUEÑO	Desde posición neutral; el sujeto flexiona únicamente desde su segunda a quinta articulación interfalángica proximal y la interfalángica distal, y luego se regresa a posición neutral.
PUÑO GRANDE	Desde posición neutral; el sujeto flexiona todas sus articulaciones para formar un puño y luego regresar a posición neutral.
SEÑA DE "OK"	Desde posición neutral; el sujeto flexiona para formar una "O" con la punta de su dedo pulgar con la punta de cada uno de sus dedos, y regresar a posición neutral luego de cada uno.
SEPARACIÓN DE DEDOS	Desde posición neutral; la mano se coloca sobre una superficie plana y separa sus dedos lo más ancho posible antes de regresar a posición neutral.
OPOSICIÓN DEL PULGAR	Desde posición neutral; el sujeto cruza la palma de su mano y toca la punta de su dedo pulgar con su quinta articulación metacarpofalángica y luego regresa a posición neutral.
AGARRE	El sujeto agarra la pelota Thera-Band® Hand Exerciser con la palma de su mano y aprieta hasta que la pelota se deprima un 50%.
AGARRE DE LLAVE	El sujeto agarra la pelota Thera-Band® Hand Exerciser en medio del lado de su pulgar y el lado de su dedo índice y aprieta la pelota hasta que esta se deprima un 50%.
PELLIZCO DE DEDO	El sujeto agarra la pelota Thera-Band® Hand Exerciser en medio de la punta de su dedo pulgar y la punta de su dedo índice y aprieta hasta que la pelota se deprima un 50%; esto se repite para los dígitos del 3 al 5.

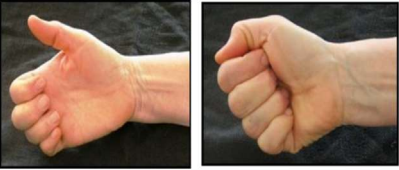
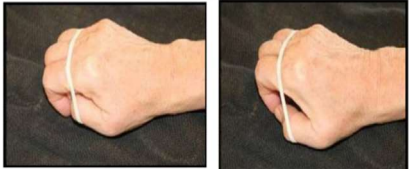
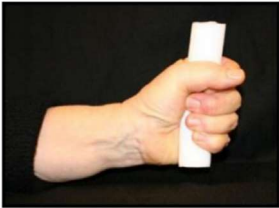
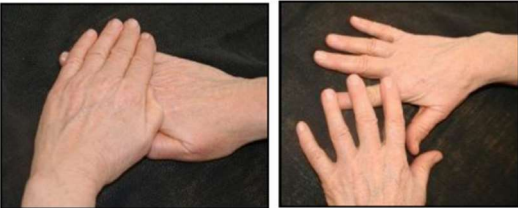
Fuente: (Rogers & Wilder, 2009)

Tabla 6. Primer parte del programa de ejercicios para personas con artrosis de mano

ILUSTRACIÓN DEL EJERCICIO	INSTRUCCIONES
<p>1.</p> 	<p>Extensión de hombro: Siéntese en una silla sin brazos, con las rodillas ligeramente flexionadas y los talones en el suelo. Posición inicial: manos en pronación parcial (pulgar hacia arriba), cerca de las rodillas. Tire de la banda de ejercicio hacia atrás, mientras las manos siguen el muslo hasta la cresta ilíaca.</p>
<p>2.</p> 	<p>Curl de bíceps: De pie, con los pies separados a la altura de los hombros y los brazos colgando. Manos están en supinación (pulgar lateralmente). Doble ambos codos, tirando de la banda de ejercicio hacia los hombros.</p>
<p>3.</p> 	<p>Flexión de hombros: De pie, con los pies separados a la altura de los hombros y los brazos colgando. Manos están en pronación (pulgar medialmente). Mantenga los codos extendidos y levante los brazos al nivel de la cara.</p>
<p>4.</p> 	<p>Haga un "signo O": mantenga las articulaciones IP y MCP del pulgar ligeramente flexionadas en todo momento. Primero, abre la mano como si agarrara una botella. Lleve la punta del dedo índice a la punta del pulgar, manteniendo el MCP, articulaciones PIP y DIP flexionadas. Abre la mano de nuevo ("agarrar la botella"). Repita con el tercero, cuarto y quinto dedos.</p>

Fuente: (Østerås et al., 2014)

Tabla 7. Segunda parte del programa de ejercicios para personas con artrosis de mano

ILUSTRACIÓN DEL EJERCICIO	INSTRUCCIONES
<p>1.</p> 	<p>Haga un puño: primero, flexione del segundo al quinto DIP y PIP solamente (mantenga los MCP extendidos). Luego flexione los MCP. Mantener durante 5s. Inversa: extienda solo los MCP, luego los PIP y DIP.</p>
<p>2.</p> 	<p>Abducción/extensión del pulgar: coloque una o más bandas elásticas pequeñas alrededor del primero para quinta falange proximal. Descanse el puño suelto, en pronación, sobre una superficie plana. mantener el pulgar articulaciones MCP e IP flexionadas y abducidas/extendidas del pulgar. Mantener durante 5s.</p>
<p>3.</p> 	<p>Fuerza de agarre: apriete un tubo de aislamiento de tubería lo más fuerte posible (sujeción isométrica) durante 10 s.</p>
<p>4.</p> 	<p>Estiramiento de los dedos: coloque la mano derecha sobre una superficie plana. Usa la mano izquierda para aplicar una presión firme. durante 30s estirando las juntas PIP y DIP segunda a quinta. Repita 2 veces para cada mano. Si las articulaciones de los dedos duelen: estire un dedo a la vez; coloque el segundo al cuarto las puntas de los dedos (mano opuesta) entre las articulaciones de los dedos del segundo dedo; presione durante 3s.</p>

Fuente: (Østerås et al., 2014)

IV. METODOLOGÍA

Durante este capítulo se detalla la metodología de la investigación, mostrando el enfoque de esta, las variables de investigación, las técnicas, materiales utilizados y la metodología de estudio.

4.1. ENFOQUE

La presente investigación cuenta con un enfoque cuantitativo, siendo este el que corresponde de manera directa al objetivo de este trabajo. El enfoque cuantitativo hace uso de la recolección de datos y su posterior análisis para responder una o más preguntas de investigación (Vega-Malagón et al., 2014).

4.2. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Una vez definido el enfoque de la investigación, se establecen las variables dependientes e independientes de investigación, las cuales se relacionan entre sí (Ilustración 21). Las variables dependientes son el motivo por el cual se realiza la investigación, mientras que las variables independientes son todo aquello que puede alterar a la variable dependiente.

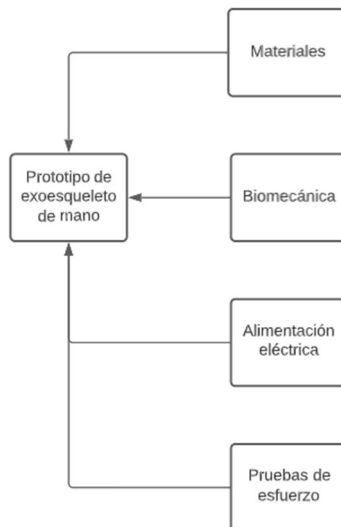


Ilustración 21. Organigrama variables dependientes e independientes.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

4.2.1. VARIABLES DEPENDIENTES

La variable dependiente es el fenómeno que resulta, por lo cual, en este caso se tiene como variable dependiente al prototipo de exoesqueleto, ya que por medio de este se complementarán las variables independientes de la investigación. Siendo el prototipo el principal alcance para llevar a cabo en el proyecto de investigación.

4.2.2. VARIABLES INDEPENDIENTES

Las variables independientes son aquellas que pueden ser manipuladas, estas son las pruebas que se realizan a nivel experimental, con el fin de justificar los valores que serán obtenidos en el desarrollo del proyecto e interpretar los resultados alcanzados. Entre las variables independientes propuestas se encuentran las siguientes:

- **Materiales.** El análisis de los materiales tiene un papel importante en la realización del proyecto, se debe de tener en cuenta aquellos materiales que son compatibles con la piel. De igual manera, se toma en cuenta la resistencia con la que cuentan estos materiales y sus costos.
- **Biomecánica.** Es imprescindible evaluar el movimiento del mecanismo del prototipo, tomando en cuenta el actuador utilizado y la biomecánica de las falanges de los dedos de la mano.
- **Alimentación eléctrica.** El voltaje y amperaje deben de ser considerados para el correcto funcionamiento de los motores que realizaran los movimientos del prototipo.
- **Pruebas de esfuerzo.** Por medio de las pruebas de esfuerzos se logrará obtener el factor de seguridad de las piezas, para poder concluir que el diseño establecido es funcional o si la pieza puede sufrir alguna deformación.

4.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

A continuación, se presentan las técnicas e instrumentos que fueron fundamentales para el proceso de desarrollo del prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano. Entre estas técnicas e instrumentos se encuentran los dispositivos para medición, máquinas de elaboración de piezas, técnicas para el diseño de las piezas y los softwares utilizados para la culminación del proyecto. Entre estas técnicas e instrumentos se encuentran:

- SolidWorks: Este es un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para el modelamiento y ensamblaje en 3D y planos en 2D (Ilustración 22). El software que ofrece un abanico de soluciones para cubrir aspectos implicados en el proceso de desarrollo de productos. Los productos de SolidWorks ofrecen la posibilidad crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos de los procesos de diseño (SolidBi, 2021).



Ilustración 22. Logo SolidWorks.

Fuente: (SolidBi,2021)

- Arduino: Esta es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra. Estos permiten establecer una conexión entre el microcontrolador y los distintos señores y actuadores de una manera muy sencilla (Arduino, 2015).



Ilustración 23. Logo Arduino.

Fuente: (Arduino, 2015)

- Proteus. Esta es una aplicación para la ejecución de proyectos de construcción de dispositivos electrónicos en todas sus etapas, se utiliza para el diseño del esquema electrónico, programación del software, simulación de proyectos, depuración de errores, documentación y construcción (Proteus, 2018).



PROTEUS

Ilustración 24. Logo Proteus.

Fuente: (Proteus, 2018)

- Impresión 3D: La impresión 3D es un conjunto de procesos que producen objetos a través de la adición de materiales en capa que concierne a las sucesivas secciones transversales del modelo en 3D por medio de la utilización de una máquina de impresión 3D (Ilustración 26). Los materiales que son utilizados con frecuencia en la impresión 3D son los plásticos y las aleaciones de metal, pero de igual manera se pueden utilizar materiales como el hormigón o el tejido vivo. Este método se utiliza para crear de forma eficiente piezas únicas y piezas geométricas complejas (¿Qué es la impresión 3D?, 2019).



Ilustración 25. Máquina de impresión 3D.

Fuente: (Amazon, 2022)

A continuación, se encuentran las técnicas empleadas en la elaboración del prototipo, entre las técnicas utilizadas para el desarrollo del prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano para pacientes afectadas por artrosis, entre ellas se encuentran las siguientes:

- Modelado 3D. El modelado 3D de las partes del prototipo se desarrolló con la ayuda del software de SolidWorks, en el cual se hizo el modelado del prototipo final para poder visualizar de mejor manera la integración de todas las partes que constituyen al prototipo de exoesqueleto de rehabilitación.
- Ensamblaje del prototipo. El ensamblaje consta de la integración de todas las partes que constituyen al prototipo final. Desde la integración de los sistemas eléctricos y electrónicos, los componentes mecánicos los cuales brindan el movimiento al prototipo y el enlazamiento de las partes impresas 3D.
- Programación. El lenguaje utilizado en el desarrollo del prototipo es Arduino el cual está basado en el lenguaje C++. Este lenguaje de programación proviene de la extensión del lenguaje de programación C.

4.4. MATERIALES

En el siguiente apartado, se encuentran todos los materiales los cuales en conjunto forman al prototipo de exoesqueleto de mano. Se tomará en cuenta las características de los materiales de las piezas, actuadores y partes electrónicas que engloban al prototipo.

4.4.1 FILAMENTO PLA PARA IMPRESIÓN 3D

El polímero, ácido polilático, polilactida, o más comúnmente conocido por su abreviatura PLA (Ilustración 27), es un biopolímero versátil. El PLA es biodegradable y exhibe características termoplásticas. Su uso es común en la era moderna industrial, sin embargo, se ha visto su uso en la bioingeniería (Tabla 8). Algunas aplicaciones relevantes en la medicina son su uso en materiales para ortopedia, regeneración cardíaca y propósitos dentales (DeStefano et al., 2020).

El PLA consiste en monómeros ácidos lácticos los cuales componen su columna polimérica. Algunos beneficios son: amigable con el medio ambiente, facilidad de producción, reciclable, biocompatible, y pocos a no reportados efectos carcinogénicos. La impresión

tridimensional (3D) ha emergido como una modalidad de fabricación prometedora con su variedad de aplicaciones en el campo de la medicina (DeStefano et al., 2020).

Debido a su fácil accesibilidad, sencilla utilización, bajo costo y rapidez la impresión 3D ofrece la oportunidad de diseñar dispositivos personalizados que abordan complicaciones asociados a gran variedad de pacientes (DeStefano et al., 2020).



Ilustración 26. Filamento PLA.

Fuente: (C, 2019)

Tabla 8. Características físicas del PLA comercial

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	CANTIDAD
PESO MOLECULAR	g/mol	66.000
GRAVEDAD ESPECÍFICA		1.27
DENSIDAD SOLIDA	g/cm ³	1.252
DENSIDAD DE FUSIÓN	g/cm ³	1.073
TEMPERATURA DE TRANSICIÓN DEL VIDRIO	°C	55
TEMPERATURA DE FUSIÓN	°C	165
CALOR ESPECÍFICO: 190°C	J/kg °C	2060
CALOR ESPECÍFICO: 100°C	J/kg °C	1955
CALOR ESPECÍFICO: 55°C	J/kg °C	1590
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA: 190°C	W/m °C	0.195
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA: 109°C	W/m °C	0.197
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA: 48°C	W/m °C	0.111

Fuente: (DeStefano et al., 2020)

4.4.2. ARDUINO MEGA 2560 RV3

El Arduino Mega 2560 (Ilustración 27) es una placa de microcontrolador la cual se basa en ATmega2560. Cuenta con 54 pines digitales de entrada/salida, 16 entradas analógicas, 4 puertos en serie de hardware UART, conector de alimentación 5 V y un botón de reinicio. El Arduino Mega 2560 fue elegido por la cantidad de pines con los que cuenta, en el cual se los estarán conectando cinco actuadores lineales y los módulos de alta potencia.

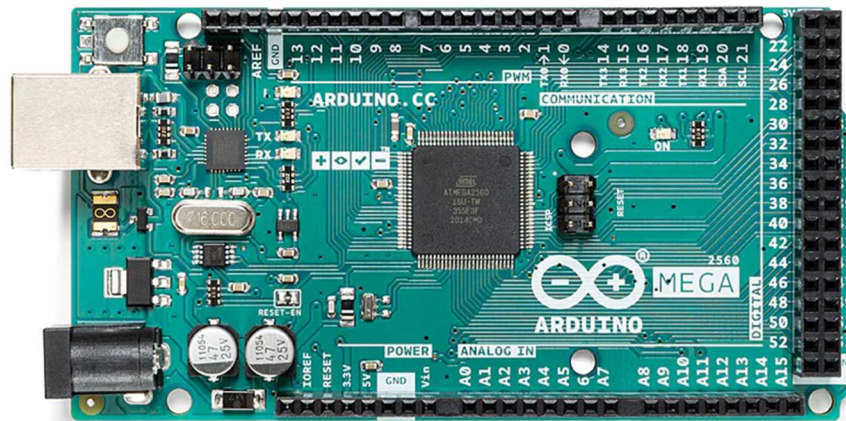


Ilustración 27. Arduino Mega 2560 RV3.

Fuente: (Arduino, 2015)

Tabla 9. Tabla de especificaciones Arduino Mega 2560

HARDWARE		ATMEGA2560
RAM		8 KB
SISTEMA OPERATIVO		IDS
PESO		0.08 lbs
LONGITUD		3 pulgadas
VOLTAJE DE FUNCIONAMIENTO	DE	5 V
VOLTAJE DE ENTRADA		7-12 V

Fuente: (Arduino, 2015)

4.4.3. ACTUADOR LINEAL JQDML

Un actuador lineal JQDML (Ilustración 28) es un dispositivo el cual convierte el movimiento rotatorio de un motor en movimiento lineal. Este tipo de dispositivos puede ser utilizado para empujar, levantar, bajar o posicionar algún objeto. Estos toman energía del sistema en una forma adecuada, ya sea de manera eléctrica, mecánica, hidráulica o neumática, y la convierte en un movimiento lineal. Este tipo de actuador permite proporcionar movimiento en dos direcciones y su movimiento puede ser preciso o brusco según la aplicación que se busque.



Ilustración 28. Actuador Lineal JQDML.

Fuente: (Amazon, 2022)

Para la fabricación del prototipo se eligió el actuador lineal de la marca JQDML, el cual cuenta con 3 pulgadas de longitud retraída y una longitud extendida de 8 pulgadas y el cual cuenta con las siguientes especificaciones (Tabla 10):

Tabla 10. Tabla de especificaciones Actuador lineal

VELOCIDAD	0.2" /SEG
CICLO DE TRABAJO	10%
PESO	0.19 lbs
LONGITUD	3 pulgadas
VOLTAJE DE ENTRADA	12 V
CORRIENTE DE TRABAJO	≤200 mA
FUERZA DE EMPUJE	6.4 N

Fuente: (Amazon, 2022)

4.4.4. MÓDULO DE ALTA POTENCIA HILETGO BTS7960 43

Es necesario un controlador de motor para poder controlar al actuador con el uso del software de ARDUINO (Ilustración 29). Por medio del controlador se logrará el movimiento de los cinco actuadores lineales que se utilizan en el prototipo.

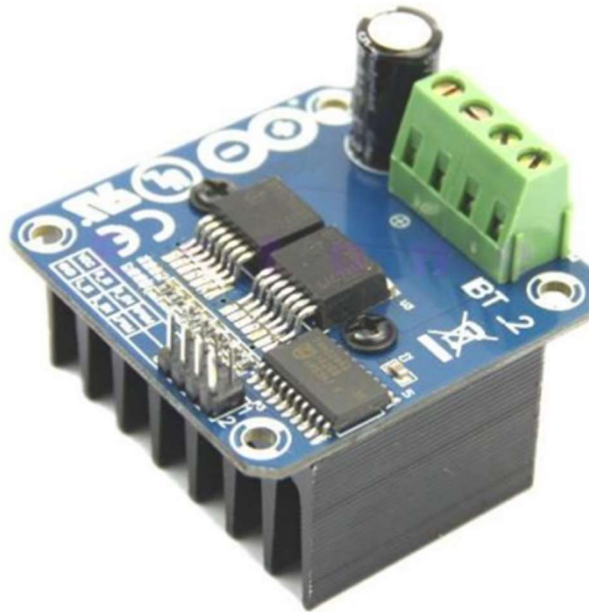


Ilustración 29. HiLetgo BTS7960 43.

Fuente: (Handson, 2016)

Se utilizarán cinco módulos de alta potencia para cada uno de los actuadores del prototipo de exoesqueleto de mano, estos módulos protegerán a los actuadores lineales contra sobre temperatura, sobretensión, sub-tensión, sobre corriente y corto circuito para que el prototipo sea de uso seguro.

Tabla 11. Tabla de especificaciones HiLetgo BTS7960 43

VELOCIDAD	0.2" /SEG
RUIDO	≤ 200 mA
CICLO DE TRABAJO	0-100%
PESO	0.11 lbs
MÉTODO DE CONTROL	PWM
VOLTAJE DE ENTRADA	6-27 V
CORRIENTE MÁXIMA	43 A

Fuente: (Handson, 2016)

4.4.5. FUENTE DE ENERGÍA CONMUTADA 12V

La fuente de alimentación conmutada (Ilustración 30) será utilizada para proporcionar los 12 V de salida DC requerido para el correcto funcionamiento de los actuadores lineales. La utilización de una fuente conmutada tiene beneficios, ya que brinda una fuente DC estable y la cual puede ser regulada para que logre brindar energía de manera eficiente.



Ilustración 30. Fuente de energía conmutada 12V.

Fuente: (CyD Tecnología, 2022)

Con la utilización de una fuente conmutada no es necesario el uso de un transformador de línea, debido a que el elemento de transferencia de energía lo puede reemplazar, reduciendo de esta manera el tamaño de la fuente y reduciendo tanto el peso como el costo del prototipo.

Tabla 12. Tabla de especificaciones fuente conmutada

VOLTAJE DE SALIDA	12 V
CORRIENTE DE SALIDA	0-1 A
MATERIAL	Aluminio
PESO	0.2 lbs
DIMENSIONES	70 x 39 x 30 mm
VOLTAJE DE ENTRADA	110 V
RANGO DE TEMPERATURA	0-95% humedad

Fuente: (CyD Tecnología, 2022)

4.5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

El presente proyecto tiene un alcance descriptivo debido a que en este se identificaron todos los pasos y procesos para la construcción de un prototipo de exoesqueleto de mano para rehabilitación de mano artrósica.

La metodología de estudio seleccionada para la investigación es la metodología en V (Ilustración 31), el cual es un modelo empleado en diversos procesos de desarrollo. Con esta metodología se definieron los sistemas y subsistemas que se integran para el desarrollo de un prototipo de exoesqueleto de mano.

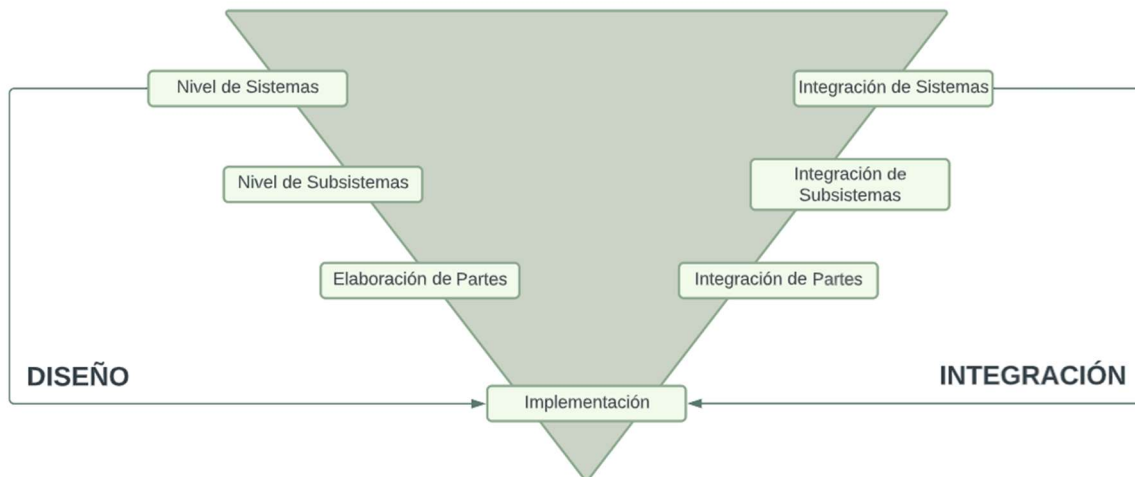


Ilustración 31. Metodología en V

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

4.5.2. NIVELES DE SISTEMAS Y SUBSISTEMAS

Para alcanzar el objetivo del desarrollo de un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano se dividen los sistemas en tres partes, primero el sistema de biomecánica, sistema estructural y sistema de control del prototipo. Cada uno de los sistemas se dividen en subsistemas los cuales se integran para la culminación del proyecto de investigación (Ilustración 32).

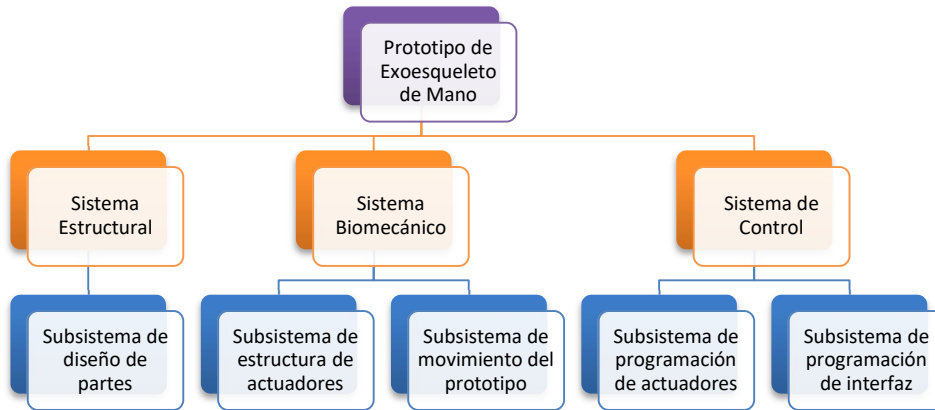


Ilustración 32. Sistemas y Subsistemas.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

4.5.3. SISTEMA ESTRUCTURAL

Para el sistema estructural se trabajó el diseño de las partes del prototipo de exoesqueleto de mano en el software de SolidWorks, se tomó en cuenta el mejor material que permitiera un diseño funcional y que soporte el peso de los actuadores sin que presente ningún tipo de deformaciones, para el diseño de las partes se tomaron en cuenta mediciones antropométricas de los dedos de la mano (Tabla 13).

Tabla 13. Mediciones antropométricas de los dedos de la mano

NOMBRE	DIÁMETRO	LONGITUD FALANGE PROXIMAL	LONGITUD FALANGE MEDIA
MEÑIQUE	16 mm	14 mm	14 mm
ANULAR	18 mm	21 mm	17 mm
DEDO MEDIO	21 mm	21 mm	18 mm
ÍNDICE	21 mm	21 mm	18 mm
PULGAR	21 mm	21 mm	18 mm

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

4.5.3.1. Subsistema de diseño de partes

Una vez se adquirieron las medidas antropométricas de los dedos de las manos, se procedió a hacer el diseño de cada una de las piezas que hicieron la sujeción de los dedos de las manos, se realizaron piezas personalizadas para cada una de las falanges de los dedos de la mano (Ilustración 33).

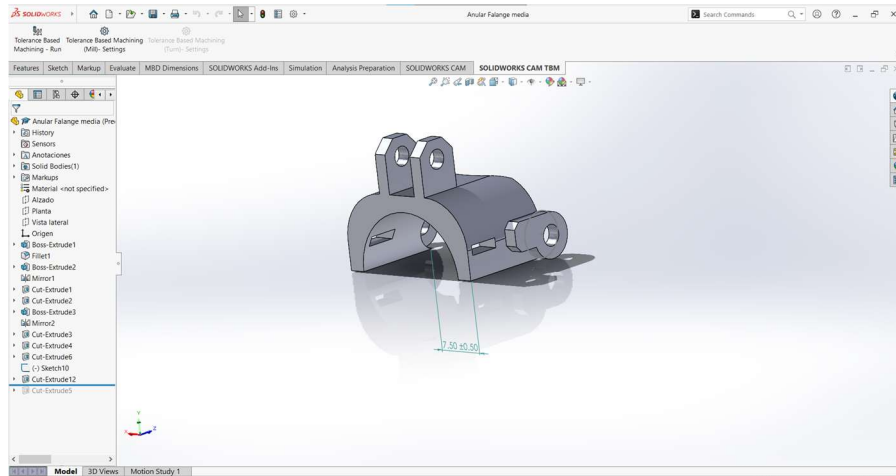


Ilustración 33. Diseño dedo anular falange media

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

En el diseño de la falange media del dedo anular, se dejaron huecos en ambos lados de la pieza para colocarle velcro para que ayudaran con la sujeción del dedo anular, el cual está conectado a una barra que une a la falange media del dedo anular con la pieza que se conecta con cada uno de los actuadores lineales (Ilustración 34).

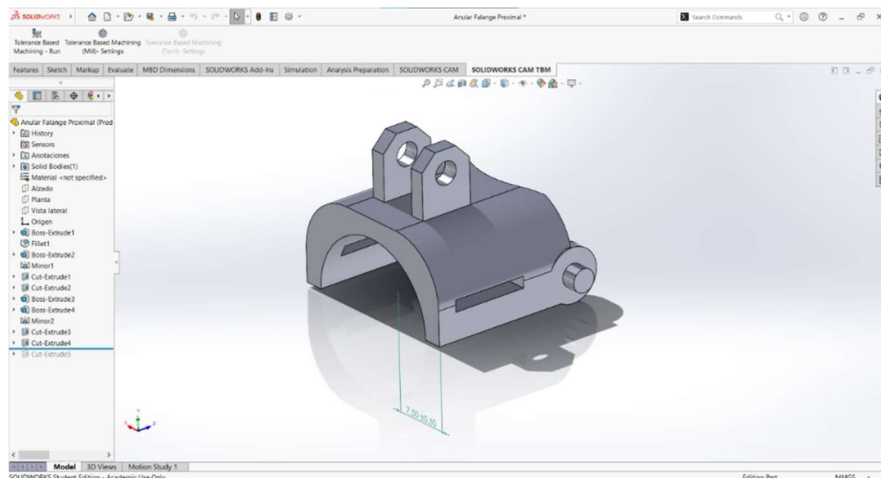


Ilustración 34. Diseño dedo anular falange proximal

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Cada uno de los dedos cuenta con dos partes que se conectan para la sujeción de cada uno de los dedos, el diseño de las partes que sujeta cada uno de los dedos se comprende de una pieza en la falange proximal y una en la falange media, las cuales por medio de conectores se ensamblan ambas piezas para lograr sujetar el dedo anular.

4.5.4. SISTEMA BIOMECÁNICO

En el sistema biomecánico se realizaron pruebas con distintos tipos de motores para la selección del más adecuado para el diseño establecido, de igual manera se determinó el movimiento del motor. Se tomaron medidas al actuador lineal seleccionado (Ilustración 35) para que cumpla con las mediciones de la mano propuesta para el diseño del prototipo de exoesqueleto de mano. Una de las ventajas que tiene el actuador lineal JQDML es su diseño de bajo ruido y nivel de protección, el cual evita la acumulación de polvo que pudiera llegar a ser dañino para el actuador y limitar su funcionamiento.



Ilustración 35. Medición al actuador lineal.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Cada uno de los motores ocupan 12 V para su activación y debido a que Arduino solamente cuenta con un puerto de alimentación de 5 V se utilizó una fuente conmutada para brindarle los 12 V a cada uno de los actuadores. La fuente conmutada es de 12 V y 1 A, cada uno de los actuadores trabajan con ≤ 200 A, por lo cual la sumatoria de los 5 amperajes de los actuadores debe de ser igual o menor al de la fuente conmutada.

4.5.4.1. Subsistema de estructura de actuadores

Para el desarrollo del prototipo de exoesqueleto de mano, se necesitó de una placa que tuviera la capacidad de sujetar los 5 actuadores lineales que le dieron movimiento al prototipo, por lo cual se desarrolló una plataforma de aluminio con tornillería M3 para atornillar la base que sujeta a los actuadores de ambos lados de la plataforma (Ilustración 36) y una plataforma para el dedo pulgar (Ilustración 37). Para esta plataforma fue necesario tomar en cuenta las medidas de los actuadores, tanto su tamaño como el grosor de estos para que pudieran estar conectados sin chocar entre sí y que las partes de sujeción de los dedos tampoco colisionen.

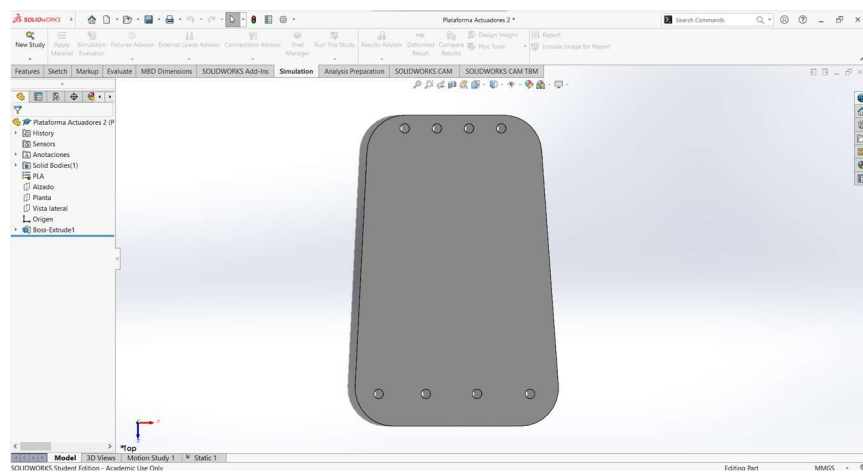


Ilustración 36. Plataforma de actuadores.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

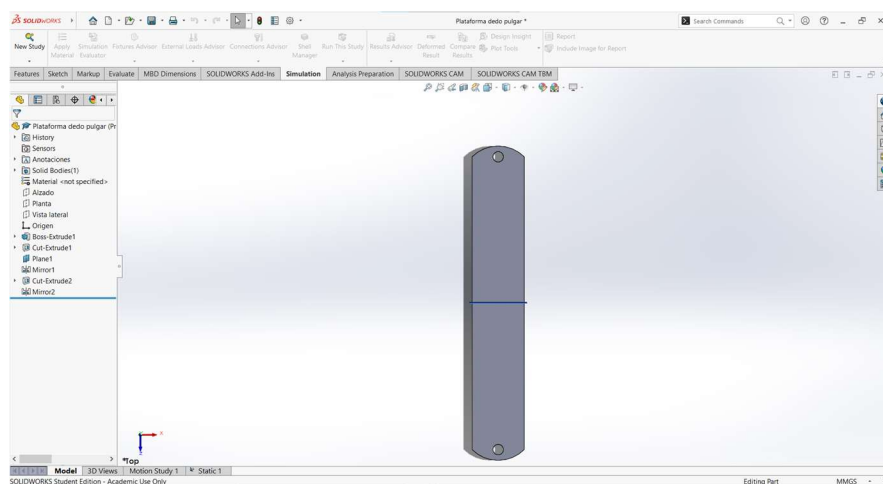


Ilustración 37. Plataforma dedo pulgar.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

4.5.4.2. Subsistema de movimiento del prototipo

El movimiento del prototipo fue realizado por medio de la utilización de cinco actuadores lineales, los cuales se colocaron en cada uno de los dedos de la mano y por medio del diseño de una pieza que se conecte al actuador se realizaron los movimientos de los cinco dedos de la mano. Al activar los actuadores se realizaron las rutinas de rehabilitación para pacientes que sufren de mano artrósica.

La estructura que conectó los actuadores con la pieza de sujeción de los dedos es una pieza que cuenta con orificios para la conexión de estos y ser capaz de realizar los movimientos de los cinco actuadores. Se realizaron dos piezas intermedias, una para los dedos medio y anular y otra para el pulgar, índice y meñique los cuales son más cortos que el dedo medio y anular. La parte intermedia (Ilustración 38) cuenta con tornillería para conectar el actuador para realizar el movimiento y la sujeción de cada una de las falanges de los dedos.

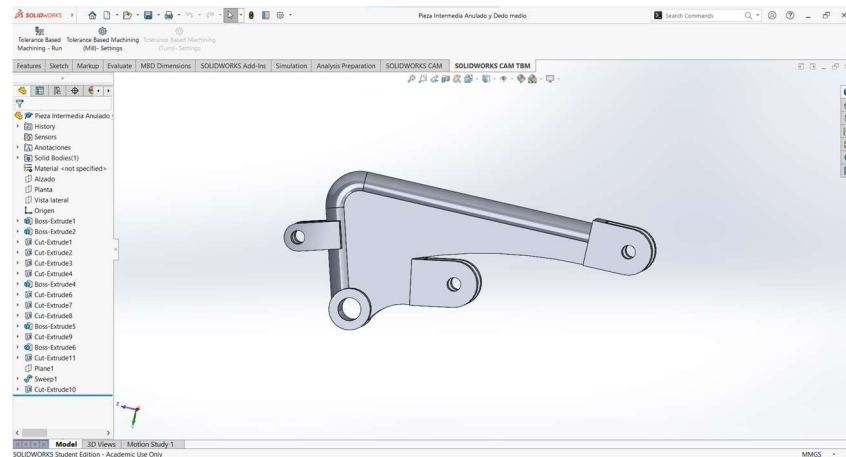


Ilustración 38. Diseño parte intermedia

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

De igual manera fue necesario el diseño de partes de conexión (Ilustración 39) con tres medidas diferentes para lograr la conexión entre las partes diseñadas, estas partes de conexión ayudarán con el movimiento de las falanges de los dedos y son requeridas diferentes tipos de medidas para integrar de manera adecuada el prototipo.

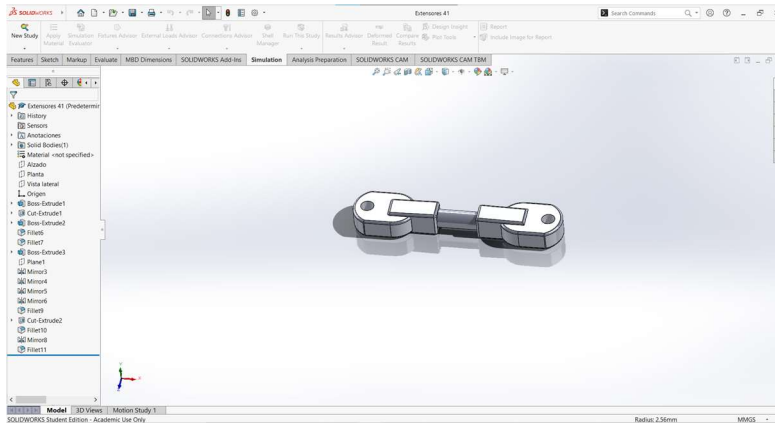


Ilustración 39. Parte de conexión.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

4.5.5. SISTEMA DE CONTROL

En cuanto el sistema de control se programaron los cinco actuadores para que le dieran el movimiento al prototipo de exoesqueleto de mano, el usuario tiene disponibles diferentes rutinas que le permiten realizar la rehabilitación de mano artrósica. Para el sistema de control se programaron los actuadores por medio del software de ARDUINO para el movimiento de los actuadores, cada uno de los actuadores realiza una función distinta y se utilizó un módulo de voz con las librerías brindadas por Arduino para un control que permita al usuario realizar sus rutinas de terapias de rehabilitación por medio de accionamiento de voz.

4.5.5.1. Subsistema de programación de los actuadores

Es esencial la programación de los actuadores para brindar movimiento al prototipo, por lo cual cada uno de ellos debe de ser accionado de distintas maneras para poder cumplir los requisitos de cada una de las rutinas programadas, por lo cual por medio del software de Proteus se diseñó circuito esquemático de las conexiones de los 5 actuadores al Arduino Mega 2560 RV3.

Para la programación de los actuadores se utilizaron las librerías brindadas por Arduino y utilizando la modulación por pulsos para brindar el movimiento de los actuadores, se programó el movimiento extensión y retracción de cada uno de los actuadores lineales, lo cuales fueron accionados por una botonera.

4.5.5.2. Subsistema de programación de interfaz de usuario

Para el control del prototipo por parte del usuario, se programó e instaló un módulo de voz para la activación de las terapias de rehabilitación por medio de comandos de voz. Esto para ayudar al paciente a realizar una mejor terapia de rehabilitación la cual lo haga sentirse auto suficiente y con facilidad de manejo.

Se utilizó el módulo de reconocimiento de voz ELECHOUSE V3 el cual puede utilizar hasta 7 comandos a la vez. Se realizó un procedimiento de entrenamiento para el accionamiento de cada una de las rutias de rehabilitación programadas.

4.6. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Proyecto de Investigación	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10
Semana 1												
Propuesta de Investigación	10/12/2022	10/18/2022	■									
Planteamiento del problema	10/12/2022	10/18/2022	■									
Semana 2												
Reunión asesor metodológico	10/19/2022	10/25/2022		■								
Recolección de información	10/19/2022	10/25/2022		■								
Semana 3												
Marco teórico	10/26/2022	11/1/2022			■							
Diseño de partes 3D	10/26/2022	11/1/2022			■							
Compra de materiales	10/26/2022	11/1/2022			■							
Inicio marco metodológico	10/26/2022	11/1/2022			■							
Semana 4												
Elaboración código	11/2/2022	11/8/2022				■						
Finalización marco metodológico	11/2/2022	11/8/2022				■						
Semana 5												
Impresión piezas 3D	11/9/2022	11/15/2022					■					
Finalización código	11/9/2022	11/15/2022					■					
Semana 6												
Ensamblaje prototipo	11/16/2022	11/22/2022						■				
Pruebas de esfuerzo prototipo	11/16/2022	11/22/2022						■				
Semana 7												
Análisis de resultados	11/23/2022	11/29/2022							■			
Resultados, conclusiones y recomendaciones	11/23/2022	11/29/2022							■			
Semana 8												
Finalización de prototipo	11/30/2022	12/6/2022								■		
Inicio artículo científico	11/30/2022	12/6/2022								■		
Semana 9												
Finalización documento	12/7/2022	12/13/2022									■	
Entrega artículo científico	12/7/2022	12/13/2022									■	
Semana 10												
Finalización del proyecto de Investigación	12/14/2022	12/20/2022										■

Ilustración 40. Cronograma de actividades.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

4.7. MATRIZ METODOLÓGICA

Tabla 14. Matriz metodológica.

Título	Problema de investigación	Preguntas de investigación	Objetivos	Variables	Metodologías y herramientas
Diseño y construcción de un prototipo de exoesqueleto de rehabilitación motora de mano para pacientes afectados por artrosis	La artrosis es la pérdida progresiva de cartílago articular, esta suele acompañarse de un proceso de reparación que incluye esclerosis ósea, formación de osteofitos, deformaciones articulares y procesos inflamatorios intercurrentes (Rojals, 2021). Estadísticas internacionales indican que unos 302 millones de personas sufren de artrosis, siendo esta una de las afectaciones con mayor frecuencia para aquellas personas con discapacidad de destreza (Rojals, 2021).	General	General	Dependiente	Modelado 3D Programación con lenguaje C++ Ensamblaje del prototipo SolidWorks Arduino Impresión 3D
		¿Cómo desarrollar un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano para personas afectadas por artrosis?	Desarrollar un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano para personas afectadas por artrosis.	Prototipo de exoesqueleto de mano	
		Específicas	Específicos	Independientes	
		¿Qué materiales pueden ser utilizados en el desarrollo de un prototipo de exoesqueleto de mano?	Indagar sobre los materiales disponibles que influirían en la manufactura de un prototipo de exoesqueleto de rehabilitación para personas afectadas por artrosis.	Materiales Biomecánica Alimentación eléctrica Pruebas de esfuerzo	
		¿Podría lograrse la fabricación de un prototipo exoesqueleto de mano rehabilitador para pacientes con mano artrósica con los materiales disponibles en métodos actuales de impresión 3D?	Valorar los resultados obtenidos sobre los distintos materiales disponibles para la fabricación del prototipo para el tratamiento de artrosis.		
		¿Qué diseño de exoesqueleto de mano impreso 3D permitiría la realización de ejercicios para rehabilitación para el tratamiento de artrosis de mano?	Formular una alternativa de diseño que permita al prototipo propuesto cumplir con las rutinas de ejercicios de rehabilitación para mano artrósica.		
		¿Se posible fabricar un prototipo de exoesqueleto de mano que sea útil para ejercicios de rehabilitación física?	Fabricar un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano con partes impresas 3D.		

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

4.8. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tabla 15. Operacionalización de las variables.

Objetivo General	VARIABLES Dependientes	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Desarrollar un prototipo de Exoesqueleto para rehabilitación de mano para personas afectadas por artrosis.	Prototipo de exoesqueleto de mano.	Procesos en el desarrollo de un prototipo que ayude a los pacientes con la rehabilitación de mano artrósica.	Impresión 3D Rehabilitación física. Prototipo.	Tiempo de rehabilitación. Logra los ejercicios de rehabilitación.
Objetivos Específicos	VARIABLES Independientes	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Indagar sobre los materiales disponibles que influirían en la manufactura de un prototipo de exoesqueleto de rehabilitación para personas afectadas por artrosis.	Materiales Biomecánica Alimentación eléctrica	Evaluación de los materiales mejor compatibles para la elaboración de un prototipo de exoesqueleto de mano.	Costos. Resistencia.	Biocompatibilidad de los materiales.
Valorar los resultados obtenidos sobre los distintos materiales disponibles para la fabricación del prototipo para el tratamiento de artrosis.	Pruebas de esfuerzo	Selección de materiales para el desarrollo del prototipo de exoesqueleto de mano.	Movimiento del prototipo.	Cantidad de ejercicios de rehabilitación que permite el prototipo.
Formular una alternativa de diseño que permita al prototipo propuesto cumplir con las rutinas de ejercicios de rehabilitación para mano Artrósica.		Diseño del prototipo que permita la realización de los ejercicios de rehabilitación física.	Voltaje. Amperaje.	Cantidad de amperaje y voltaje requerida para el funcionamiento.
Fabricar un prototipo de Exoesqueleto para rehabilitación de mano con partes impresas 3D.		Fabricación de un exoesqueleto de mano que permita al paciente realizar ejercicios de rehabilitación para mano artrósica.	Deformación. Factor de seguridad.	Cantidad de peso que aguanta el prototipo.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)









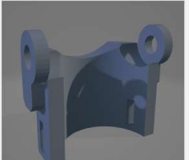
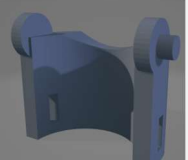
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el siguiente capítulo se abordan los resultados obtenidos del diseño y construcción del prototipo de exoesqueleto de mano, su programación y la integración de sus sistemas.

5.1. SISTEMA ESTRUCTURAL

Para el sistema estructural del prototipo de exoesqueleto rehabilitador de mano se utilizó el software de SolidWorks. Para el diseño de cada una de las piezas se utilizaron las medidas de la Tabla 13, como objetivo se tuvo que el prototipo lograra realizar ciertas rutinas de ejercicios que puedan ayudar a mejorar la condición de la artrosis de mano. Se diseñaron 17 piezas individuales (Tabla 16 y 17), las cuales en conjunto integran al prototipo de exoesqueleto de mano.

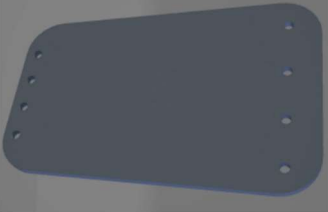



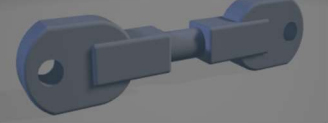
Tabla 16. Representación de las partes de sujeción.

NOMBRE	REPRESENTACIÓN	
ANULAR FALANGE MEDIA Y PROXIMAL		
DEDO MEDIO FALANGE MEDIA Y PROXIMAL		
DEDO ÍNDICE FALANGE MEDIA Y PROXIMAL		
DEDO PULGAR FALANGE DISTAL Y PROXIMAL		
DEDO MEÑIQUE FALANGE MEDIA Y PROXIMAL		

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Cada una de las partes de sujeción de los dedos fueron diseñadas con las medidas antropológicas tanto de tamaño como de diámetro de las falanges de los dedos. Cada una de las falanges proximales y medias se conectan para ser una parte en conjunto que ayudó al prototipo con el cerrado de la mano.

Tabla 17. Representación partes prototipo.

NOMBRE	REPRESENTACIÓN		
PLATAFORMA DE ACTUADORES			
PLATAFORMA DEDO PULGAR			
PARTE INTERMEDIA DEDO ANULAR Y DEDO MEDIO			
PARTE INTERMEDIA DEDO MEÑIQUE, ÍNDICE Y PULGAR			
PARTE DE CONEXIÓN			

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

5.1.1. INTEGRACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL

Una vez se diseñaron todas las partes en el software de SolidWorks, se continuo con la integración de todas las partes para poder visualizar de una mejor manera como se integran todas las partes para la construcción del prototipo. A continuación, se muestra la integración de todas las partes desde diferentes puntos de vista (Ilustraciones 41 y 42).

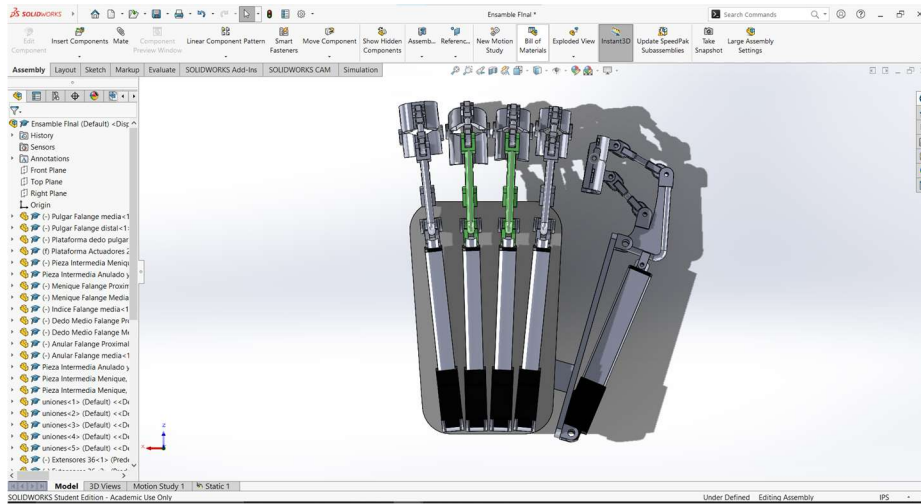


Ilustración 41. Plano superior.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

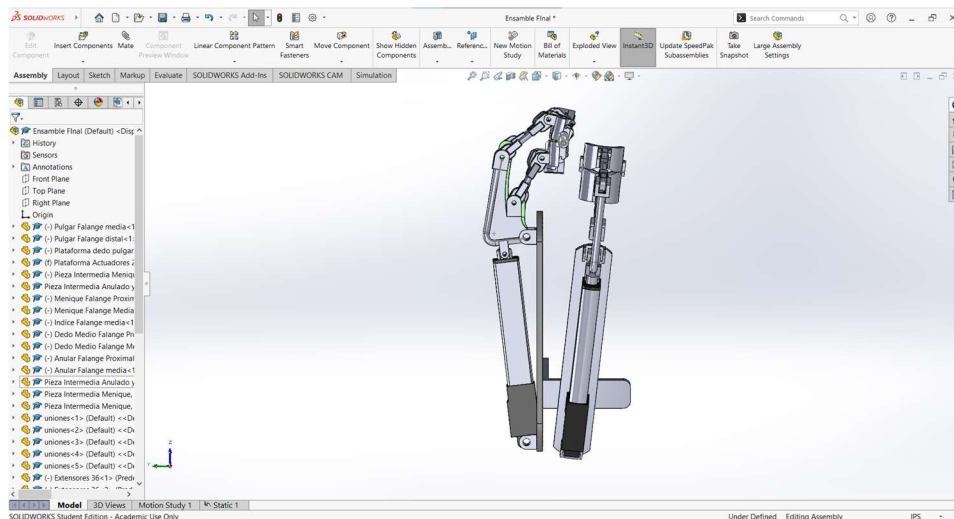


Ilustración 42. Plano lateral.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Se lograron integrar todas las partes para el prototipo de exoesqueleto de mano. Las partes intermedias que cuentan con un color verde son aquellas que son más extensas que las demás, por lo cual se tomó la decisión de distinguirlas para una mejor integración de las partes.

Durante la primera etapa del diseño se tuvieron problemas con respecto al diseño de la placa de los cuatro actuadores de los dedos de la mano, debido a que se necesitó de una inclinación en los actuadores para que las partes de sujeción no colisionaran entre sí. Este proceso de integración del sistema estructural es de suma importancia para poder visualizar si las piezas se elaboraron de la manera adecuada y que no existan partes en donde las partes choquen entre ellas, es por esto por lo que se necesitan integrar todas las partes del prototipo previo a la impresión de las partes.

5.1.2. ELABORACIÓN DE PARTES

Para la elaboración de las partes se utilizó el método de impresión 3D, se imprimieron todas las partes para la elaboración del proyecto de investigación. A continuación, se muestra parte del proceso del desarrollo de las partes (Ilustración 43).

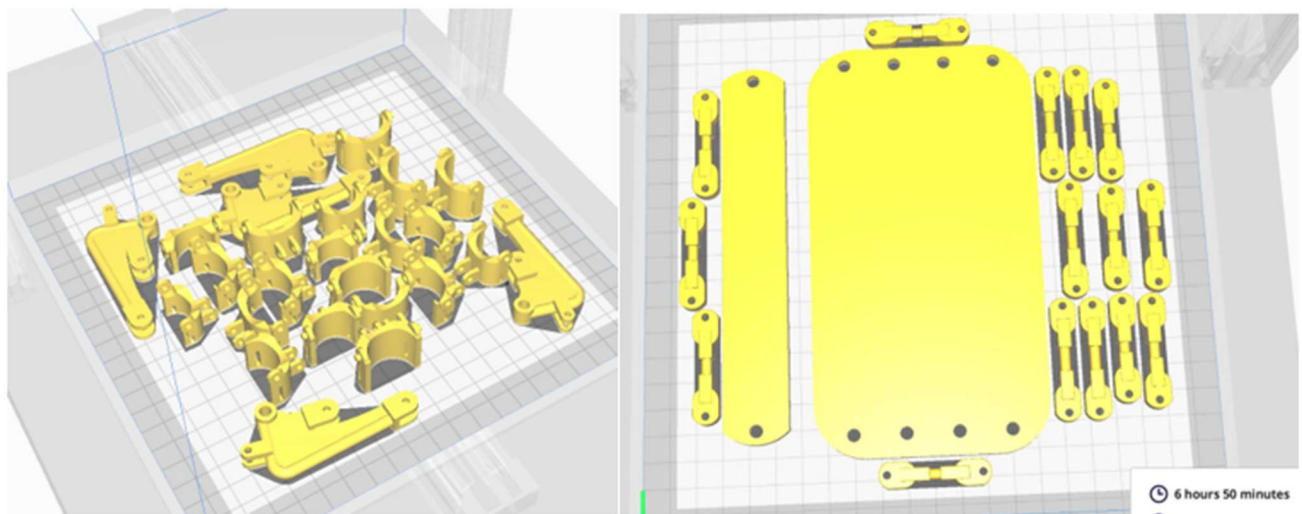


Ilustración 43. Proceso de elaboración.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Inicialmente se integraron las partes de sujeción de las falanges tanto la media como la proximal para su impresión, y la parte intermedia la cual se encargó de conectar tanto las falanges medias y proximales por medio de una parte de conexión y conectar los actuadores para brindar el movimiento al prototipo. De igual manera, se imprimieron las partes de conexión y la placa de los actuadores. La máquina de impresión 3D fue utilizada para la impresión de cada una de las partes (Ilustración 44). Una vez finalizado este proceso es importante limpiar las partes para quitar cualquier exceso del material PLA para garantizar la correcta impresión de las partes (Ilustración 45).

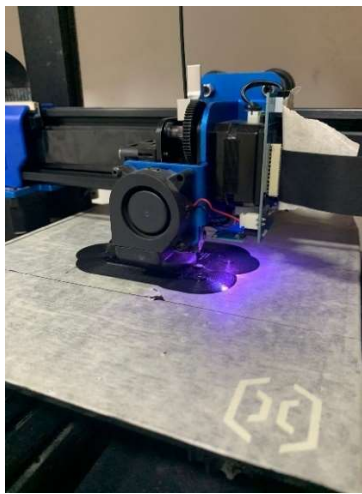


Ilustración 44. Proceso de impresión parte intermedia.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)



Ilustración 45. Parte intermedia impresa.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Durante la impresión de las partes 3D hubo distintos problemas debido al acabado que este método brindaba, ya que las piezas que se imprimieron eran de un tamaño pequeño y se usaron tornillería pequeña para su ensamblaje por lo cual el acabado de estas piezas dificultó el ensamblaje de las partes.

5.1.3. PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE PARTES

Las pruebas de desempeño para las piezas del prototipo fueron procesadas dentro del software SolidWorks en cual se estableció el material para impresión 3D PLA. Las propiedades utilizadas se pueden visualizar en la tabla 18.

Tabla 18. Propiedades del PLA

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
MÓDULOS ELÁSTICOS	3500	N/mm ²
COEFICIENTE DE POISSON	0.38	N/A
MÓDULO DE CORTE	2400	N/mm ²
DENSIDAD DE MASA	1300	Kg/m ³
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	50	N/mm ²
FUERZA COMPRESIVA	17.92	N/mm ²
LÍMITE ELÁSTICO	26.082	N/mm ²
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	0.2256	W/(m·K)
CALOR ESPECIFICO	1386	J/(kg·K)

Fuente: (Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer, 2022)

Las pruebas realizadas a la pieza fueron de tensión, desplazamiento, deformación y el factor de seguridad. La prueba de tensión se refiere a la reacción del sistema al aplicar esfuerzo, al cargar el material con una fuerza se produce estrés, el cual hace que el material se deforme. La ingeniería define la tensión como la cantidad de deformación en la dirección de la fuerza aplicada dividida por la longitud inicial del material (DesigntoFuture, 2020).

En cuanto a las pruebas de deformación y desplazamiento se puede apreciar en estas cuanto del cuerpo del material se ha desplazado de su posición original, este desplazamiento puede ser de todo el cuerpo o dentro de las moléculas de este (DesigntoFuture, 2020). Dentro de la prueba de factor de seguridad se tomaron en cuenta el criterio de la prueba de tensión y se estableció un límite elástico. La realización de estas pruebas indica si la carga prevista está acorde a lo soportado por el material propuesto.

El proceso por el cual se realizan estas pruebas inicia con el mallado dentro de SolidWorks, el cual hace uso de nodos en los cuales realiza cálculos para obtener mediciones de tensiones dentro de las partes simuladas.

5.1.2.1. Plataforma de Actuadores

El peso que fue seleccionado para las simulaciones realizadas en SolidWorks fue determinado utilizando la ecuación 1. La masa considerada fue el peso de los 5 actuadores, previamente estipulado en la tabla 9.

$$w = mg$$

Ecuación 1. Peso

Fuente: (Moebs et al., 2021)

Para realizar el cálculo se convirtieron las libras a kilogramos, la misma arrojo como resultado 4.23 N; siendo este el peso al cual fue sometida la plataforma de actuadores dentro de la simulación de SolidWorks. La plataforma de actuadores fue diseñada para poder soportar 4 actuadores en su parte superior y cargar con la plataforma del dedo pulgar, la cual carga únicamente con un actuador.

La prueba de tensión realizada a la plataforma de actuadores arrojo como resultados que la fuerza elástica se encuentra en $2.608e+07 \text{ N/m}^2$ con un mínimo $6.3e+02 \text{ N/m}^2$ y un máximo de $4.767e+05 \text{ N/m}^2$. Dentro de la escala establecida entonces se puede observar que la parte simulada indica que al centro de esta existe mayor tensión a la fuerza aplicada y puede observarse que esta se encuentra arriba del límite de fuerza elástica, sin embargo, no está demasiado lejos de la misma (Ilustración 46).

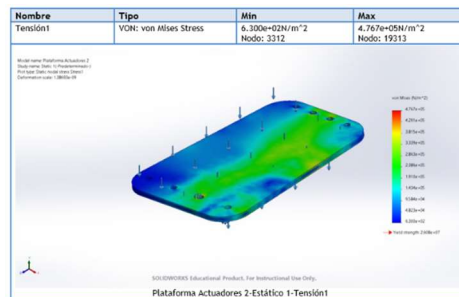


Ilustración 46. Prueba de tensión en plataforma de actuadores.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Al realizarse la prueba de deformación los límites establecidos dentro de la simulación fueron de tipo ESTRN (deformación equivalente), el mínimo fue de $2.291e-07$ y el máximo de $8.462e-05$. Al observar la escala de colores y además de esto visualizar que la parte no se encuentra deformada dentro de la simulación, se puede determinar que el material puede resistir la fuerza planteada sin crear una deformación (Ilustración 47).

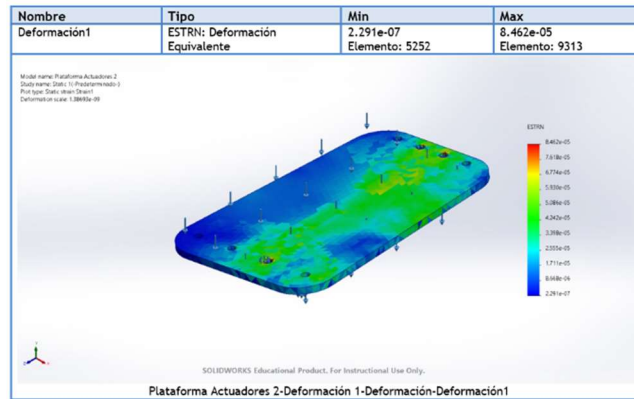


Ilustración 47. Prueba de deformación en plataforma de actuadores.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

El factor de seguridad demostró que secciones de la parte se encontraban con riesgo, como puede observarse en la ilustración 48, las únicas áreas que podrían sugerir algún tipo de daño son las ubicaciones exteriores de la plataforma. En la escala FOS se encontró un mínimo de 79,201.93 y máximo de 278,533.625.

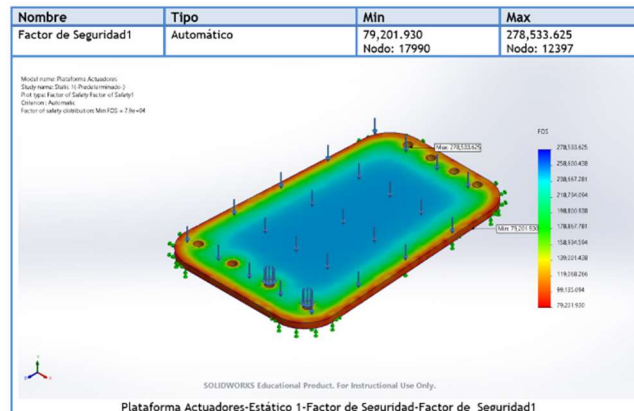


Ilustración 48. Factor de seguridad en plataforma de actuadores.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

5.1.2.2. Plataforma para actuador del pulgar

Durante las pruebas realizadas a la plataforma para actuador del pulgar se tomó en consideración únicamente 0.85 N, lo que equivale a la fuerza ejercida por un único actuador. Las pruebas realizadas a esta plataforma fueron de tensión, de deformación y la prueba de factor de seguridad.

La prueba de tensión realizada a la plataforma para actuador del pulgar indicó como resultado un límite elástico de $2.608e+07$, al observar los resultados se concluyó que la pieza se encuentra en su gran mayoría dentro de los rangos seguros. Esto indicó que la pieza es poco propensa a sufrir daños por tensión (Ilustración 49).

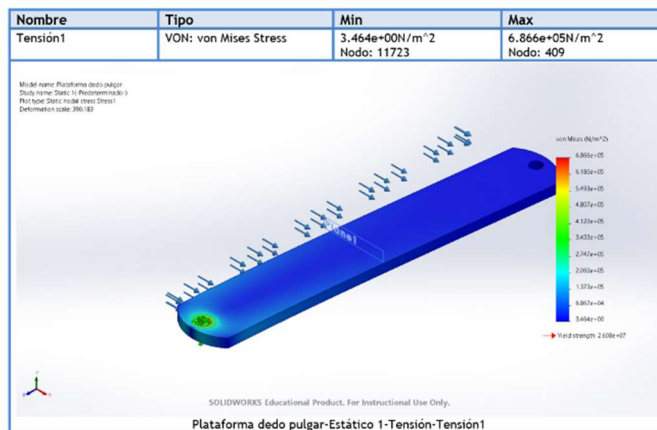


Ilustración 49. Prueba de tensión en plataforma para actuador del pulgar.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

En cuanto a la prueba de deformación realizada a la plataforma para actuador del pulgar, se pudo observar que dentro de la escala ESTRN se obtuvo un mínimo de $9.158e-09$ y máximo de $1.548e-04$. La pieza se encuentra con pocas ubicaciones en las que podría sufrir deformaciones, al percibir lo demostrado por la simulación se notó como la pieza se encontraba sin alteraciones (Ilustración 50).

La plataforma para actuador de pulgar fue entonces capaz de cumplir con su función sin sufrir de algún tipo de deformación que pueda impedir la correcta ejecución de los ejercicios previamente programados.

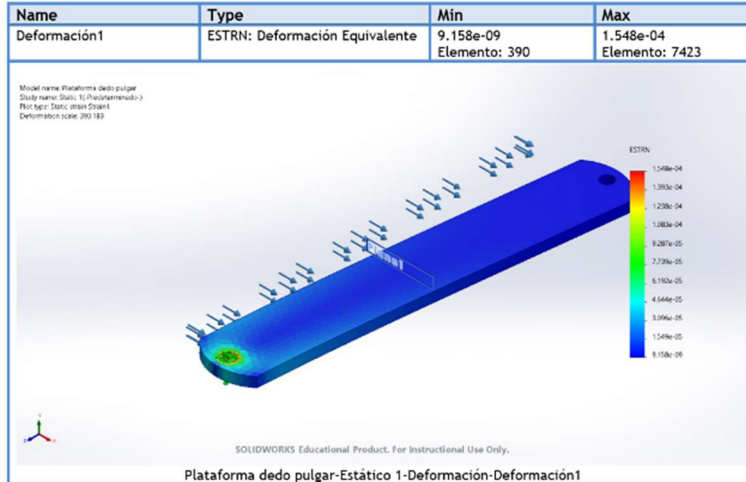


Ilustración 50. Prueba de deformación en plataforma para actuador del pulgar.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Según los resultados entregados por la simulación se determinó que el factor de seguridad de la pieza se cumple, y además que se encuentra dentro de la parte más segura provista en la escala FOS (factor de seguridad) dentro del software (Ilustración 51).

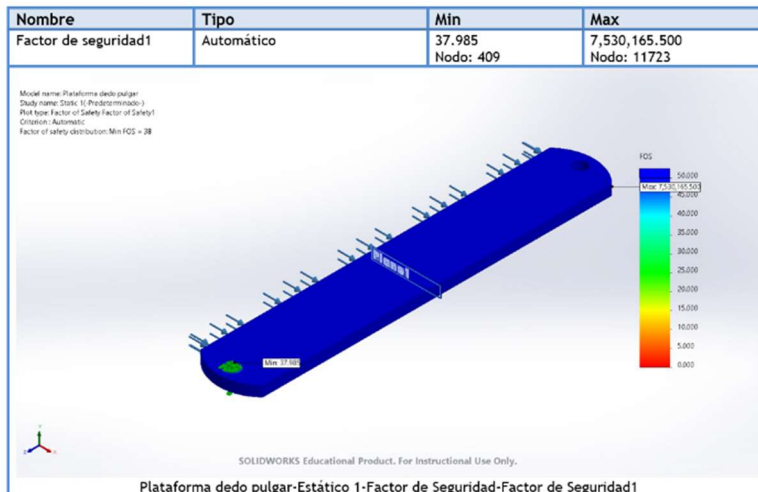


Ilustración 51. Factor de seguridad en plataforma para actuador del pulgar.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

5.1.2.3. Parte Intermedia

La prueba de desplazamiento se realizó en la parte intermedia utilizando la fuerza de empuje establecida en la tabla 10, siendo esta de 6.4 N. Se concluyó que la pieza tiene solamente un área en la cual podría dificultarse su desplazamiento, siendo esta el área superior de conexión, sin embargo, al realizarse las pruebas en físico estas dificultades no sucedieron (Ilustración 52).

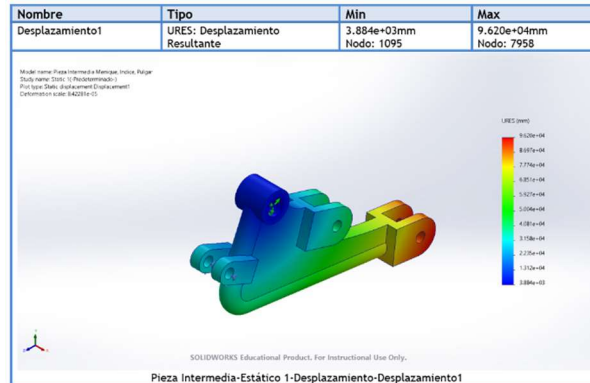


Ilustración 52. Prueba de desplazamiento en parte intermedia.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

La prueba de deformación realizada a la parte intermedia presentó resultados positivos dado que la pieza se encuentra dentro de los límites más bajos en la escala ESTRN a excepción del área de conexión inferior el cual tiene un escaso riesgo de deformación. La escala ESTRN tuvo un mínimo de $1.537e-11$ y un máximo de $1.255e-04$ (Ilustración 53).

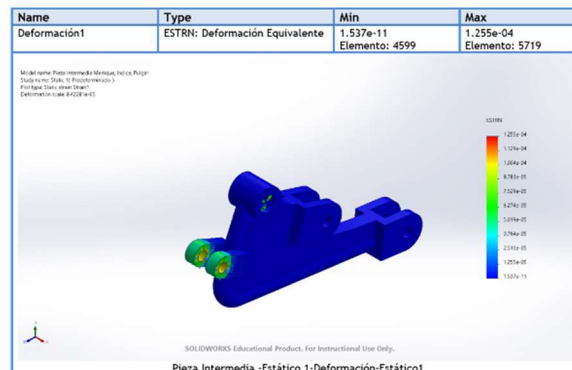


Ilustración 53. Prueba de deformación en parte intermedia.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

La prueba de seguridad en la parte intermedia indicó que el límite elástico de la pieza fue de $2.600e+07$, demostrando que dentro de la escala VON (estrés de von Mises) esta se encontraba en lo más mínimo indicando que la única parte que podría sufrir por la tensión aplicada es la sección de sujeción inferior (Ilustración 54).

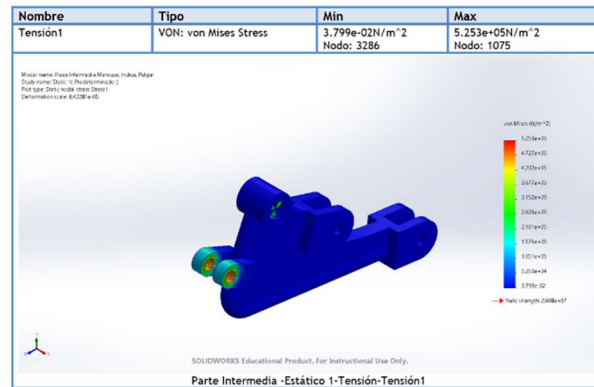


Ilustración 54. Prueba de tensión en parte intermedia.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

El factor de seguridad realizado a la parte intermedia indicó que dentro de la escala FOS, la cual tenía un mínimo de 49.656 y un máximo de 686,556,416, la pieza se encontraba en los valores más bajos lo cual señalo que la pieza es de uso seguro (Ilustración 55).

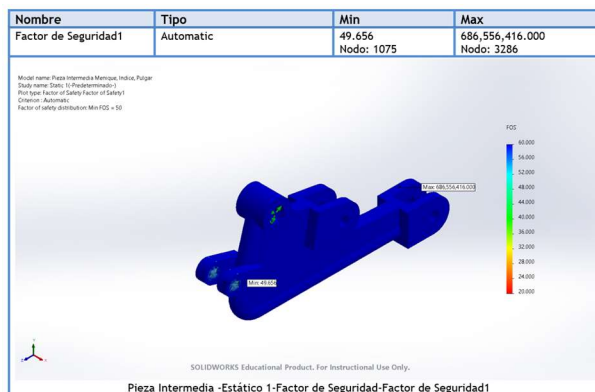


Ilustración 55. Factor de seguridad de parte intermedia.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

5.2. PROGRAMACIÓN DEL PROTOTIPO

Para la programación del prototipo se utilizó el software de ARDUINO para lograr programar cada uno de los actuadores utilizados para que cumplieran con su función de brindarle el movimiento al prototipo, la programación utilizada en este proyecto se abordará a continuación.

En la primera etapa de la programación (Ilustración 56) se definen cada uno de los pines del Arduino que se utilizaron para la conexión de los actuadores lineales y los botones que se utilizaron para accionar los movimientos de estos. Para la programación de los actuadores se utiliza la modulación por ancho de pulso, esta técnica modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, lo cual nos permitió controlar la extensión y retracción de los actuadores. Se definió el pin 2 el cual fue utilizado para mandar las señales a cada uno de los drivers conectados a los actuadores.

De igual manera, se definieron dos pines digitales por cada uno de los dedos (meñique, anular, medio, índice y pulgar), los cuales ayudaron al movimiento hacia la izquierda y hacia la derecha del actuador. Se utilizaron tres pines digitales para cada uno de los botones utilizados.

```
Programacion_Prototipo
byte Speed=0;
int PWM = 2; // conectar pin arduino 2 a IBT-2 pin PWM
// Meñique
int MIzquierda = 30; //
int MDerecha = 31;
//Anular
int AIzquierda=32;
int ADerecha=33;
//Medio
int MeIzquierda=34;
int MeDerecha=35;
//Indice
int IIzquierda=36;
int IDerecha=37;
//Pulgar
int PIzquierda=38;
int PDerecha=39;
//Botones
int boton1=53;
int boton2=52;
int boton3=50;
```

Ilustración 56. Primera etapa programación.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

A continuación, en la segunda etapa de programación (Ilustración 57), se configuraron el modo de trabajo de los pines de los botones y de los dedos de la mano, en el cual por medio de la función "void setup ()" se configuraron cada uno de los pines como salidas digitales. Esta etapa es de suma importancia debido a que se definen las funciones que fueron utilizadas en el desarrollo del código final.

```
void setup() {  
  
    pinMode(10, OUTPUT); // pin 10 output  
    pinMode(11, OUTPUT); //pin 11 output  
    //Meñique  
    pinMode(MIzquierda, OUTPUT); // pin 10 output  
    pinMode(MDerecha, OUTPUT); //pin 11 output  
    //Anular|  
    pinMode(AIzquierda, OUTPUT);  
    pinMode(ADerecha, OUTPUT);  
    //Medio  
    pinMode(MeIzquierda, OUTPUT);  
    pinMode(MeDerecha, OUTPUT);  
    //Indice  
    pinMode(IIzquierda, OUTPUT);  
    pinMode>IDerecha, OUTPUT);  
    //Pulgar  
    pinMode(PIzquierda, OUTPUT);  
    pinMode(PDerecha, OUTPUT);  
  
    //Botones  
    pinMode(boton1, INPUT); // Input boton 1  
    pinMode(boton2, INPUT); // Input boton 2  
    pinMode(boton3, INPUT); // Input boton 3  
    Serial.begin(9600);  
}
```

Ilustración 57. Segunda etapa programación.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

En la tercera etapa de programación (Ilustración 58) se programó dentro de un loop cada uno de los botones que dieron movimiento al prototipo, para esto se utilizó la función de "DigitalRead", la cual sirve para leer un valor en un pin digital. El valor que este leyó es la posición del actuador, la cual puede ser HIGH o LOW.

El botón 1 regresará la posición del actuador a su posición 0, lo cual ayudó al prototipo a brindar el movimiento de extensión del prototipo. Fue importante individualizar cada uno de los dedos en la programación de cada actuador, esto debido que cada dedo de la mano dependerá de un actuador en el prototipo.

```
void loop() {
  if(digitalRead(boton1) == HIGH & digitalRead(boton2) == LOW) {
    // retraer el actiador a la mitad de su velocidad
    //Meñique
    digitalWrite(MIzquierda, HIGH);
    digitalWrite(MDerecha, LOW);
    //Anular
    digitalWrite(AIzquierda, HIGH);
    digitalWrite(ADerecha, LOW);
    //Medio
    digitalWrite(MeIzquierda, HIGH);
    digitalWrite(MeDerecha, LOW);
    //Indice
    digitalWrite(IIzquierda, HIGH);
    digitalWrite(IDerecha, LOW);
    //Pulgar
    digitalWrite(PIzquierda, HIGH);
    digitalWrite(PDerecha, LOW);
    for (int i=170; i<225; i++) {
      analogWrite(PWM, i);

      Serial.print("R :");
      Serial.println(i);
    }
    //Meñique
    digitalWrite(MIzquierda, LOW);
    digitalWrite(MDerecha, LOW);
    //Anular
    digitalWrite(AIzquierda, LOW);
    digitalWrite(ADerecha, LOW);
    //Medio
    digitalWrite(MeIzquierda, LOW);
    digitalWrite(MeDerecha, LOW);
    //Indice
    digitalWrite(IIzquierda, LOW);
    digitalWrite(IDerecha, LOW);
    //Pulgar
    digitalWrite(PIzquierda, LOW);
    digitalWrite(PDerecha, LOW);
  }
}
```

Ilustración 58. Tercera etapa programación.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Para la cuarta etapa de programación (Ilustración 59) se programó el segundo botón, el cual sigue la misma lógica que el botón uno, solamente que este se programó para realizar el movimiento de flexión de la mano, por lo cual cuando Arduino lea que el botón 1, se encuentra LOW, es decir, que el actuador se encuentra en su posición neutral, este realizará el movimiento de extensión de los dedos de la mano.

```

else if(digitalRead(boton1) == LOW & digitalRead(boton2) == HIGH) {
  // extender el actuador
  //Meñique
  digitalWrite(MIzquierda,LOW);
  digitalWrite(MDerecha,HIGH);
  //Anular
  digitalWrite(AIzquierda,LOW);
  digitalWrite(ADerecha,HIGH);
  //Medio
  digitalWrite(MeIzquierda,LOW);
  digitalWrite(MeDerecha,HIGH);
  //Indice
  digitalWrite(IIzquierda,LOW);
  digitalWrite(IDerecha,HIGH);
  //Pulgar
  digitalWrite(PIzquierda,LOW);
  digitalWrite(PDerecha,HIGH);
  for (int i=225;i>170;i--){
    analogWrite(PWM,i);

    Serial.print("L :");
    Serial.println(i);
  }
  //Meñique
  digitalWrite(MIzquierda,LOW);
  digitalWrite(MDerecha,LOW);
  //Anular
  digitalWrite(AIzquierda,LOW);
  digitalWrite(ADerecha,LOW);
  //Medio
  digitalWrite(MeIzquierda,LOW);
  digitalWrite(MeDerecha,LOW);
  //Indice
  digitalWrite(IIzquierda,LOW);
  digitalWrite(IDerecha,LOW);
  //Pulgar
  digitalWrite(PIzquierda,LOW);
  digitalWrite(PDerecha,LOW);
}

```

Ilustración 59. Cuarta etapa programación.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Para finalizar la etapa de programación de los actuadores se programó el tercer botón, en la quinta etapa de programación (ilustración 60). En esta etapa de programación se optó por un método distinto al botón uno y dos, en el cual se le envió un solo impulso presionando el botón tres para que los actuadores realizaran una rutina de conteo, en la cual cada uno de ellos se extiende y atrae simulando el conteo de cada uno de los dedos de la mano.

```

else if(digitalRead(boton2) == LOW & digitalRead(boton3) == HIGH){
  //Meñique
  digitalWrite(MIzquierda,HIGH);
  digitalWrite(MDerecha,LOW);
  delay(550);
  digitalWrite(MIzquierda,LOW);
  digitalWrite(MDerecha,HIGH);
  delay(1500);
  //Anular
  delay(1500);
  digitalWrite(AIzquierda,HIGH);
  digitalWrite(ADerecha,LOW);
  delay(550);
  digitalWrite(AIzquierda,LOW);
  digitalWrite(ADerecha,HIGH);
  //Medio
  delay(1500);
  digitalWrite(MeIzquierda,HIGH);
  digitalWrite(MeDerecha,LOW);
  delay(550);
  digitalWrite(MeIzquierda,LOW);
  digitalWrite(MeDerecha,HIGH);
  //Indice
  delay(1500);
  digitalWrite(IIzquierda,HIGH);
  digitalWrite(IDerecha,LOW);
  delay(550);
  digitalWrite(IIzquierda,LOW);
  digitalWrite(IDerecha,HIGH);
  //Pulgar
  delay(1500);
  digitalWrite(PIzquierda,HIGH);
  digitalWrite(PDerecha,LOW);
  delay(550);
  digitalWrite(PIzquierda,LOW);
  digitalWrite(PDerecha,HIGH);
}
}

```

Ilustración 60. Quinta etapa programación.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Para una mejor comprensión del código se elaboró un pseudo código el cual ayudó a tener una mejor comprensión visual del funcionamiento del sistema de programación del prototipo de exoesqueleto de mano. Para la programación del prototipo se tomaron en cuenta las características de los drivers, los cuales trabajan por medio de la modulación por ancho de pulso.

5.2.1 PSEUDO CÓDIGO

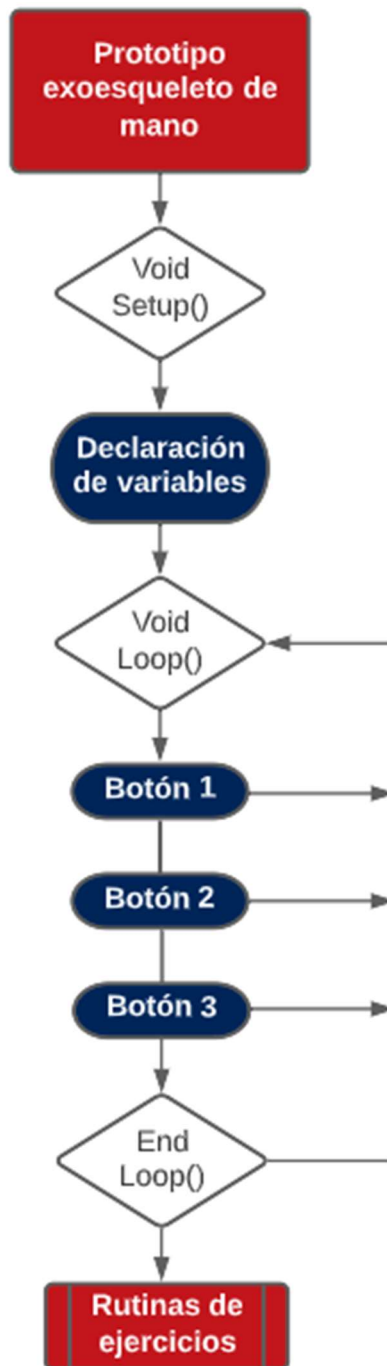


Ilustración 61. Pseudo código.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

5.3. INTEGRACIÓN SISTEMA ELÉCTRICO

Para la integración del sistema eléctrico se utilizó una fuente conmutada de 12 V y 1 A para alimentar los 5 actuadores lineales los cuales trabajan con 12 V y cada uno de ellos trabaja con un amperaje de <math><200\text{ mA}</math>, por lo cual la sumatoria del amperaje de los cinco actuadores debe de ser $\leq 1\text{ A}</math>. Por medio de la utilización de la fuente conmutada se logró conectar el cable de alimentación a una fuente de 110 V y que los actuadores recibieran solamente los 12 V que es su voltaje de trabajo.$

El montaje del sistema eléctrico el cual alimenta al prototipo, en el círculo café se puede observar la fuente conmutada de 12 V (Ilustración 62), la cual tiene una salida para el cable de alimentación y en los círculos blancos se muestran los dos bornes utilizados para alimentar a los módulos de alta potencia. Cada uno de los bornes alimenta a los módulos con V+ y V-.

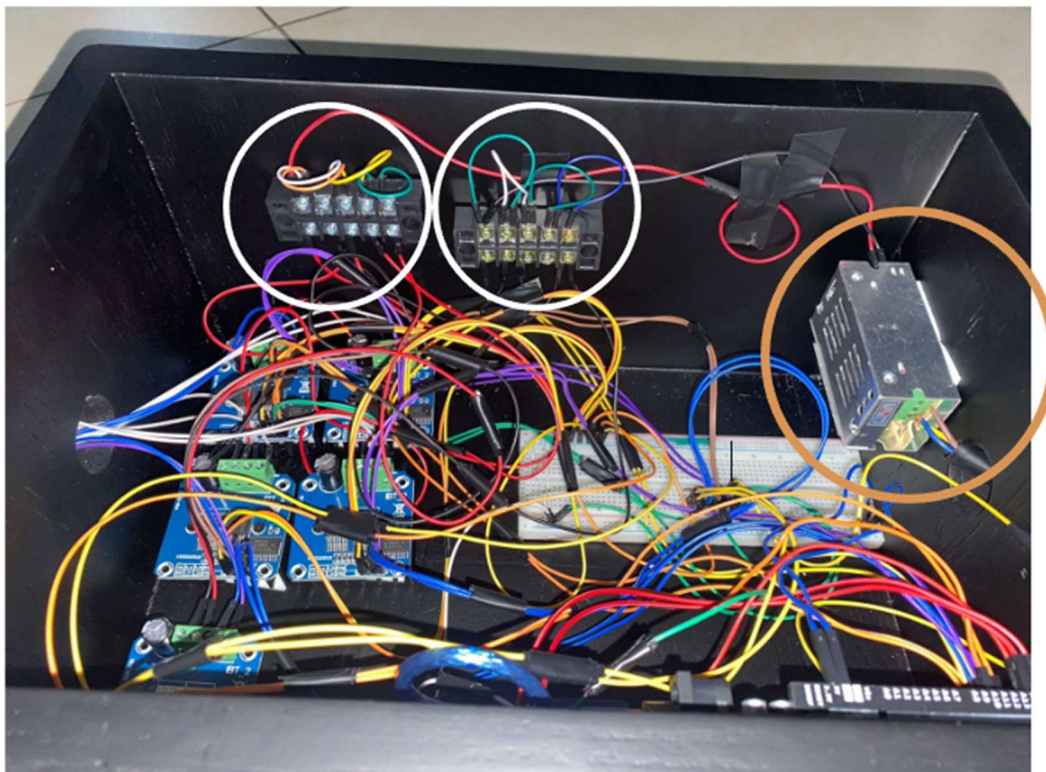


Ilustración 62. Integración sistema eléctrico.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

5.4. INTEGRACIÓN SISTEMA ELECTRÓNICO

5.4.1. MODELO ESQUEMÁTICO DE CONEXIONES ELECTRÓNICAS

Se realizó un modelo esquemático (Ilustración 63) utilizando el software de Proteus para una mejor visualización de las conexiones del sistema electrónico del prototipo de exoesqueleto de mano.

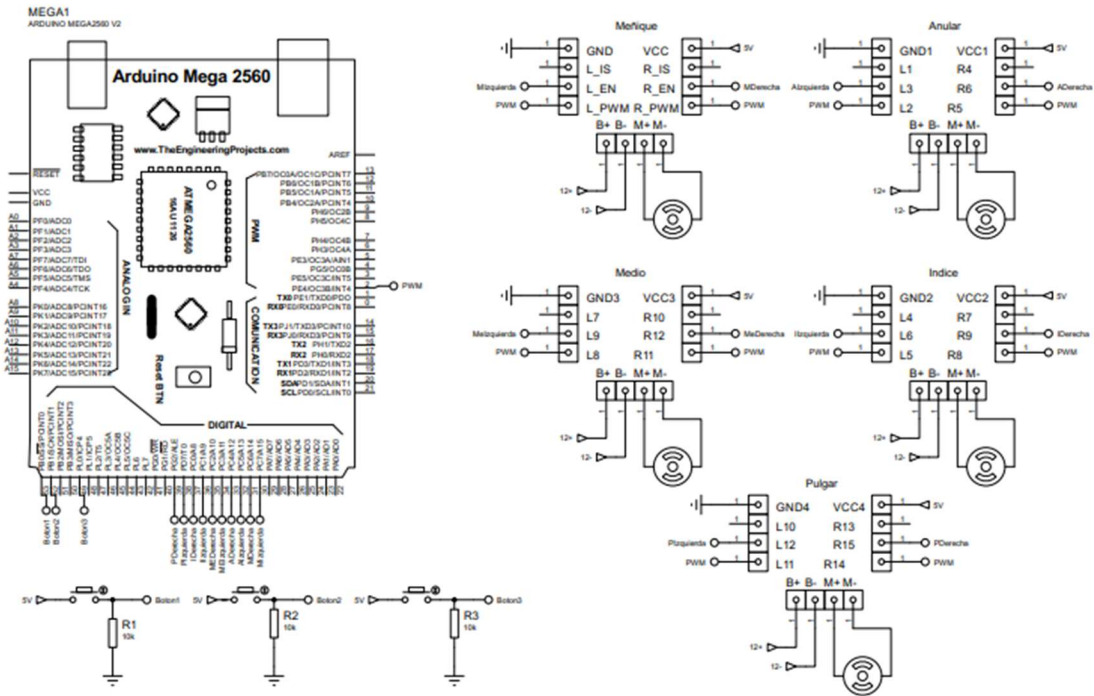


Ilustración 63. Modelo esquemático Proteus.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

5.4.2. MONTAJE DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

Para el sistema electrónico del prototipo se utilizó como controlador el Arduino Mega 2560 V3, el cual se encargó del control de los cinco actuadores del prototipo. Se utilizaron 5 módulos de alta potencia los cuales se encargan del cambio de giro de los actuadores lineales y como elemento de protección de los actuadores (Ilustración 64). De igual manera, estos módulos se encargan de llevar los 12 V a cada uno de los actuadores para su correcto funcionamiento.

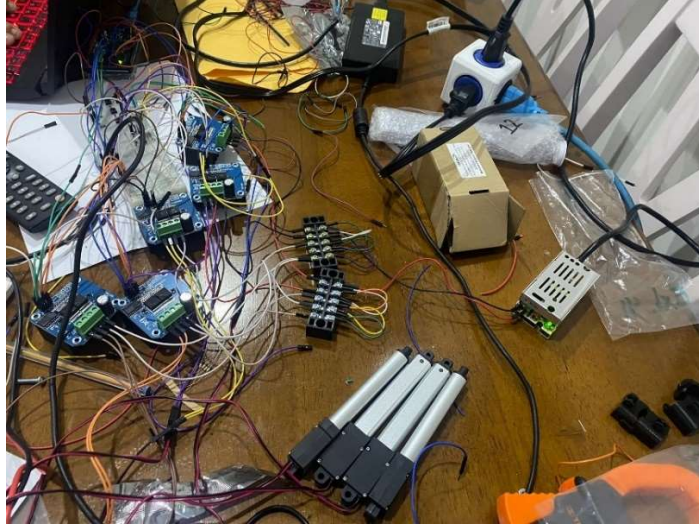


Ilustración 64. Primer montaje del sistema electrónico.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Se realizó un primer montaje para probar el funcionamiento de los 5 actuadores y que realizaran las rutinas programadas. Una vez se comprobó el funcionamiento de los actuadores y que la programación estaba funcionando de manera adecuada se continuó con el montaje en una carcasa de madera (Ilustración 65).



Ilustración 65. Carcasa de madera.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

La carcasa de madera contó con tres agujeros que servirán para salidas tanto de los cables de conexión de los actuadores, el cable de alimentación eléctrica y la botonera la cual se encarga de realizar las rutinas. Durante el primer montaje (Ilustración 66) se realizaron las primeras conexiones para asegurarse del funcionamiento del primera actuadores, para luego realizar el montaje completo del sistema electrónico (Ilustración 67).



Ilustración 66. Proceso de montaje sistema electrónico.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

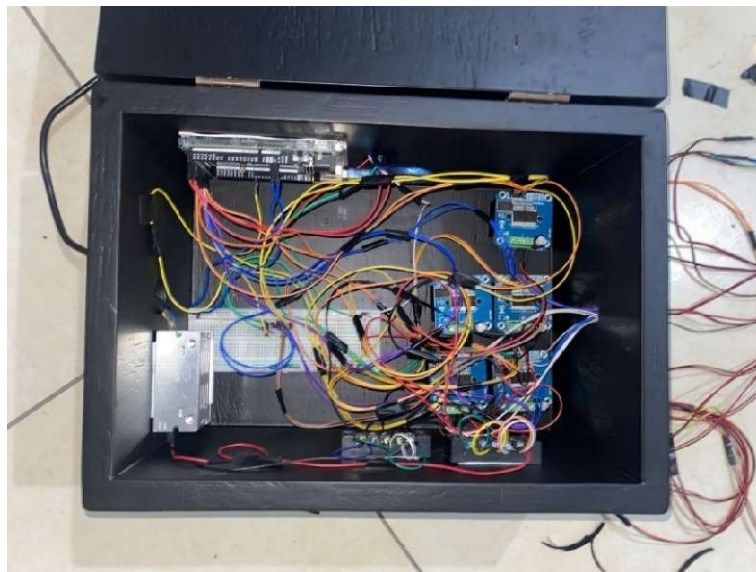


Ilustración 67. Montaje final sistema electrónico.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

5.5. INTEGRACIÓN SISTEMA BIOMECÁNICO

5.5.1. MONTAJE PROTOTIPO DE EXOESQUELETO DE MANO

Una vez se realizó el montaje del prototipo en SolidWorks, se imprimieron las partes que componen al prototipo y se completó el montaje electrónico, se continuó con el montaje de este. Para el montaje de los actuadores se utilizó una plataforma en la cual se colocaron 4 de los 5 actuadores. Para el quinto actuador, el cual pertenece al dedo pulgar se diseñó una plataforma aparte, la cual por medio de una escuadra se unió a la plataforma de los actuadores. De igual manera, se ensamblaron las partes de sujeción de los dedos con su respectivo elemento conector.

El ensamble de las dos partes de sujeción de los dedos (Ilustración 68) tiene la función de realizar el movimiento de las falanges del dedo, para la unión de ambas partes se utilizó tornillería M3 la cual es una tornillería delgada que permitió la unión de ambas partes.



Ilustración 68. Ensamble partes falange media y proximal.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Cada uno de los dedos cuenta con su propio elemento de sujeción, en la Ilustración 68 se muestra cómo se colocan en cada uno de ellos. Esta pieza ayudó con el movimiento de flexión de los dedos de la mano (Ilustración 69).



Ilustración 69. Representación de ensamblaje.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Durante el proceso de ensamblaje del prototipo se inició con el montaje del dedo pulgar, el cual cuenta con una plataforma aparte. Se utilizó la tornillería de los actuadores para su ensamble en la plataforma (Ilustración 70). Para el ensamble se unieron un extremo del actuador a la parte inferior de la pieza intermedia (círculos azules) y se hizo la unión a la parte intermedia (círculo rojo) la cual con la ayuda de la extensión del actuador realizó el movimiento de flexión del dedo pulgar.



Ilustración 70. Ensamble plataforma dedo pulgar.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Se realizó el mismo procedimiento para el montaje de los cuatro actuadores en la plataforma (Ilustración 71), los cuales cuentan con el mismo mecanismo de movimiento del prototipo. Los actuadores lineales se encargaron de realizar los movimientos de flexión y extensión de cada uno de los dedos. Una vez montados todos los actuadores (Ilustración 72) se prosiguió a una prueba del movimiento realizado por cada uno de los actuadores.



Ilustración 71. Proceso montaje placa actuadores.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)



Ilustración 72. Montaje prototipo.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

En la Ilustración 73 y 74 se muestra el montaje del prototipo conectado a la mano derecha. Para colocar el prototipo en la mano se utilizó una férula, se le añadió velcro en la parte inferior del prototipo para que sirviera como accesorio junto con la férula.



Ilustración 73. Prototipo final extendido.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)



Ilustración 74. Prototipo final flexionado.

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

5.6. RESULTADOS DE COSTOS

En este apartado se abordaron todos los costos de materiales, componentes electrónicos e impresión 3D.

Tabla 19. Costos componentes electrónicos.

COMPONENTE ELECTRÓNICO	COSTO
Arduino Mega 2560 V3	1,030 L
Conmutador 12 V	180 L
Módulos De Alta Potencia (5)	1,358 L
Protoboard	90 L
Cable USB	150 L
Set De Jumpers (2)	572 L
Resistencia Y Botones	30 L
Bornes (2)	160 L
TOTAL	3,570 L

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Tabla 20. Costos materiales.

MATERIALES	COSTO
Carcasa de madera	500 L
Férula	260 L
Tornillería	150 L
TOTAL	910 L

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Tabla 21. Costos materiales mecánicos.

MOTOR	COSTO
Actuador lineal (5)	4,075 L
TOTAL	4,075 L

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Tabla 22. Costo partes del prototipo.

MÉTODO DE IMPRESIÓN	COSTO
Impresión 3D	1,510 L
TOTAL	1,510 L

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

Para la elaboración de los costos del prototipo de exoesqueleto de mano no se tomaron en cuenta los costos de mano de obra propia, solamente se tomaron en cuenta todos los materiales que componen al prototipo. En la Tabla 23 se detalla el costo final del prototipo el compone de los componentes electrónicos, materiales de elaboración, compra de los actuadores lineales y costos de impresión de cada parte componen al prototipo elaborado.

Tabla 23. Costo final del prototipo.

PROTOTIPO EXOESQUELETO DE MANO	COSTO
Componentes electrónicos	3,570 L
Materiales	910 L
Motores	4,075 L
Impresión 3D	1,510 L
TOTAL	10,065 L

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

VI. CONCLUSIONES

Se desarrolló un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano para personas afectadas por artrosis, mediante la aplicación de conocimientos técnicos y utilización de materiales disponibles.

- Los materiales que influyeron para la manufactura del prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano para personas afectadas por artrosis fueron el material de impresión 3D PLA, los elementos electrónicos y componente mecánico. La utilización de aluminio para la placa de actuadores se encontró dentro de las opciones materiales, pero debido al ligero peso del PLA se optó por el mismo.
- Se realizaron pruebas dentro del software SolidWorks en las cuales se lograron validar la seguridad y capacidad de soporte de las partes diseñadas utilizando el material PLA.
- Se diseñó en el software SolidWorks un ensamblaje que permitiese realizar rutinas de ejercicios para rehabilitación de mano artrósica, el cual posteriormente fue ensamblado en físico utilizando piezas impresas en 3D.
- El prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano afectada por artrosis se fabricó con el uso de materiales electrónicos, mecánicos y partes impresas 3D, este permite realizar ejercicios de rehabilitación mediante el movimiento de los dedos.

VII. RECOMENDACIONES

- Se debe considerar la utilización de actuadores lineales de baja potencia para movimientos pausados de terapia de rehabilitación.
- Se tienen que identificar mejoras en el diseño del prototipo para una mayor ergonomía en el mismo.
- Se debe elaborar una placa electrónica para reemplazar el circuito electrónico montado, para lograr disminuir el peso del equipo.
- Se aconseja reemplazar el Arduino Mega por un microcontrolador para una mayor flexibilidad en el montaje de sistema electrónico.
- Se deben realizar pruebas clínicas en pacientes que sufran de artrosis.

VIII. APLICABILIDAD/ IMPLEMENTACIÓN

El prototipo de exoesqueleto de rehabilitación motora de mano para pacientes afectados por artrosis tiene aplicabilidad dentro del área de la fisioterapia, la rehabilitación motora y la terapia ocupacional. Dentro de la fisioterapia el prototipo puede ser utilizado para la culminación de rutinas de ejercicios destinadas al tratamiento de artrosis de mano.

En el ámbito de la rehabilitación motora y la terapia ocupacional el prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano afectada por artrosis puede ser utilizado para regresar el funcionamiento natural de la mano a los pacientes que se sometan a los tratamientos.

IX. EVOLUCIÓN DE TRABAJO ACTUAL/TRABAJO FUTURO

Durante el desarrollo del proyecto de investigación surgieron distintas incógnitas las cuales pueden ser utilizadas para una segunda etapa de la investigación. Con los resultados obtenidos se concluyó que el prototipo ayuda al paciente con los movimientos de algunas rutinas de terapia de rehabilitación para pacientes afectados por artrosis, pero es necesario la realización de pruebas clínicas que ayuden a demostrar el efecto que podría tener el uso de un exoesqueleto de mano activo en el mejoramiento en los dedos atrofiados producto de la artrosis.

Mediante la realización de pruebas clínicas se podría evaluar en una manera rigurosa el funcionamiento del prototipo y si es seguro para ser utilizado en pacientes. De igual manera, se podría realizar una comparativa con un prototipo de exoesqueleto pasivo para identificar cuál de los dos trae mayores beneficios para los pacientes que padecen de artrosis.

X. CONCORDANCIA DE LOS SEGMENTOS DE LA TESIS CON LA INVESTIGACIÓN

Tabla 24. Concordancia de los segmentos de la tesis con la investigación.

Capítulo I	Capítulo II		Capítulo III	Capítulo IV	
Introducción	Preguntas de Investigación	Objetivos	Marco Teórico	Variables	Metodología de estudio
<p>Entre las patologías que afectan a la población mundial encontramos a la artrosis, la cual es una enfermedad que ataca principalmente a los adultos mayores y la cual les origina un déficit de capacidad motora. Esta se trata de un deterioro progresivo en las articulaciones, tales como pueden ser las rodillas, la cadera o los dedos, la cual causa deformación, genera rigidez y dolor a la persona afectada. La artrosis es una enfermedad degenerativa, por lo cual no tiene cura, pero se puede prevenir y retrasar un avance de la enfermedad. Esto puede llegar a causar mayores problemas en el futuro, mejorar la calidad de vida al paciente y tratar de preservar el movimiento de los dedos.</p>	General	General	<p>En la elaboración de este capítulo se abordó un análisis de la situación actual sobre la elaboración de exoesqueletos de mano para rehabilitación. Se recopiló información acerca de la artrosis, la anatomía y biomecánica de la mano para culminar con las terapias utilizadas para la rehabilitación de la artrosis.</p>	Dependiente	<p>La metodología de estudio seleccionada para la investigación es la metodología en V, el cual es un modelo empleado en diversos procesos de desarrollo. Con esta metodología se definieron los sistemas y subsistemas que se integran para el desarrollo de un prototipo de exoesqueleto de mano.</p>
	¿Cómo desarrollar un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano para personas afectadas por artrosis?	Desarrollar un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano para personas afectadas por artrosis.		Prototipo de exoesqueleto de mano	
	Específicas	Específicos		Independiente	
	¿Qué materiales pueden ser utilizados en el desarrollo de un prototipo de exoesqueleto de mano?	Indagar sobre los materiales disponibles que influirían en la manufactura de un prototipo de exoesqueleto de rehabilitación para personas afectadas por artrosis.		Materiales	
	¿Podría lograrse la fabricación de un prototipo exoesqueleto de mano rehabilitador para pacientes con mano artrósica con los materiales disponibles en métodos actuales de impresión 3D?	Valorar los resultados obtenidos sobre los distintos materiales disponibles para la fabricación del prototipo para el tratamiento de artrosis.		Biomecánica	
	¿Qué diseño de exoesqueleto de mano impreso 3D permitiría la realización de ejercicios para rehabilitación para el tratamiento de artrosis de mano?	Formular una alternativa de diseño que permita al prototipo propuesto cumplir con las rutinas de ejercicios de rehabilitación para mano artrósica.		Alimentación eléctrica	
¿Se posible fabricar un prototipo de exoesqueleto de mano que sea útil para ejercicios de rehabilitación física?	Fabricar un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano con partes impresas 3D.	Pruebas de esfuerzo			

Capítulo V	Capítulo VI	Capítulo VII	Capítulo VIII	Capítulo IX
Resultados	Conclusiones	Recomendaciones	Aplicabilidad /Implementación	Evolución del trabajo
<p>Los resultados obtenidos engloban la construcción y diseño del prototipo de exoesqueleto de mano para rehabilitación de pacientes afectados por artrosis. Dentro de estos se obtuvo los resultados de simulaciones de esfuerzo por parte de las piezas, la programación de los ejercicios, el ensamblaje simulado, la integración del sistema electrónico y el ensamblaje final del prototipo.</p>	<p>Se desarrollo un prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano para personas afectadas por artrosis, mediante la aplicación de conocimientos técnicos y utilización de materiales disponibles.</p>	<p>Se debe considerar la utilización de actuadores lineales de baja potencia para movimientos pausados de terapia de rehabilitación.</p>	<p>El prototipo de exoesqueleto de rehabilitación motora de mano para pacientes afectados por artrosis tiene aplicabilidad dentro del área de la fisioterapia, la rehabilitación motora y la terapia ocupacional.</p>	<p>Con los resultados obtenidos se concluyó que el prototipo ayuda al paciente con los movimientos de algunas rutinas de terapia de rehabilitación para pacientes afectados por artrosis, pero es necesario la realización de pruebas clínicas que ayuden a demostrar el efecto que podría tener el uso de un exoesqueleto de mano activo en el mejoramiento en los dedos atrofiados producto de la artrosis.</p>
	<p>Los materiales que influyeron para la manufactura del prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano para personas afectadas por artrosis fueron el material de impresión 3D PLA, los elementos electrónicos y componente mecánico.</p>	<p>Se tienen que identificar mejoras en el diseño del prototipo para una mayor ergonomía en el mismo.</p>		
	<p>Se realizaron pruebas dentro del software SolidWorks en las cuales se lograron validar la seguridad y capacidad de soporte de las partes diseñadas utilizando el material PLA.</p>	<p>Se debe elaborar una placa electrónica para reemplazar el circuito electrónico montado, para lograr disminuir el peso del equipo.</p>		
	<p>Se diseñó en el software SolidWorks un ensamblaje que permitiese realizar rutinas de ejercicios para rehabilitación de mano artrósica, el cual posteriormente fue ensamblado en físico utilizando piezas impresas en 3D.</p>	<p>Se aconseja reemplazar el Arduino Mega por un microcontrolador para una mayor flexibilidad en el montaje de sistema electrónico.</p>		
	<p>El prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de mano afectada por artrosis se fabricó con el uso de materiales electrónicos, mecánicos y partes impresas 3D, este permite realizar ejercicios de rehabilitación mediante el movimiento de los dedos.</p>	<p>Se deben realizar pruebas clínicas en pacientes que sufran de artrosis.</p>		

Fuente: (Elaboración propia, 2022)

BIBLIOGRAFÍA

1. Artrosis en la mano | Elsevier Enhanced Reader. (s/f). [https://doi.org/10.1016/S0716-8640\(14\)70101-4](https://doi.org/10.1016/S0716-8640(14)70101-4)
2. C, L. (2019, agosto 18). Guía completa: El filamento PLA en la impresión 3D. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/>
3. CARACTERIZACIÓN CINEMATICA DE LA MANO. - CINEMÁTICA DE LA MANO. (2007). <https://1library.co/article/caracterizaci%C3%B3n-cinematica-mano-cinem%C3%A1tica-mano.nzw0eegy>
4. default—Stanford Medicine Children’s Health. (s/f). Recuperado el 18 de octubre de 2022, de <https://www.stanfordchildrens.org/es/topic/default?id=anatomyofthehand-85-P04195>
5. DesigntoFuture. (2020, junio 19). Static Analysis in SOLIDWORKS. Designtofuture. <https://designtofuture.com/static-analysis/>
6. du Plessis, T. (2021). *A Review of Active Hand Exoskeletons for Rehabilitation and Assistance*.
7. DeStefano, V., Khan, S., & Tabada, A. (2020). Applications of PLA in modern medicine.
8. Global Burden of Disease (GBD 2019). (2019, marzo 17). Institute for Health Metrics and Evaluation. <https://www.healthdata.org/gbd/2019>
9. Handson, T. (2016). BTS7960 High Current 43A H-Bridge Motor Driver.
10. Kolasinski, S. L., Neogi, T., Hochberg, M. C., Oatis, C., Guyatt, G., Block, J., Callahan, L., Copenhaver, C., Dodge, C., Felson, D., Gellar, K., Harvey, W. F., Hawker, G., Herzig, E., Kwoh, C. K., Nelson, A. E., Samuels, J., Scanzello, C., White, D., ... Reston, J. (2020). 2019 American College of Rheumatology/Arthritis Foundation Guideline for the Management of Osteoarthritis of the Hand, Hip, and Knee. *Arthritis & Rheumatology* (Hoboken, N.J.), 72(2), 220–233. <https://doi.org/10.1002/art.41142>
11. Mannoni, A., Briganti, M. P., Di Bari, M., Ferrucci, L., Costanzo, S., Serni, U., Masotti, G., &

- Marchionni, N. (2003). Epidemiological profile of symptomatic osteoarthritis in older adults: A populationbased study in Dicomano, Italy. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 62(6), 576–578. <https://doi.org/10.1136/ard.62.6.576>
12. Mano | Anatomía macroscópica. Un panorama general, 2e | AccessMedicina | McGraw Hill Medical. (2022). <https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=3211§ionid=269208884#1192808305>
 13. Vega-Malagón, G., Ávila-Morales, J., Vega-Malagón, A., Camacho-Calderón, N., Becerril-Santos, A., & E. Leo-Amador, G. (2014, May 30). *PARADIGMAS EN LA INVESTIGACIÓN. ENFOQUE CUANTITATIVO Y CUALITATIVO*. *European Scientific Journal*. Retrieved September 12, 2022, from <https://ejournal.org/index.php/esj/article/view/3477>
 14. Moebis, W., Sanny, J., & Ling, S. (2021). 5.4 Masa y peso—Física universitaria volumen 1 | OpenStax. <https://openstax.org/books/física-universitaria-volumen-1/pages/5-4-masa-y-peso>
 15. Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer. (s/f). Recuperado el 15 de noviembre de 2022, de <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278&ckck=1>
 16. Patogénesis de la artrosis | Elsevier Enhanced Reader. (s/f). [https://doi.org/10.1016/S0716-8640\(14\)70098-7](https://doi.org/10.1016/S0716-8640(14)70098-7)
 17. PCB Design and Circuit Simulator Software—Proteus. (2018). <https://www.labcenter.com/>
 18. Physiotherapy, W. (Ed.). (2019). Descripción de la Fisioterapia. <https://world.physio/sites/default/files/2021-05/PS-2019-Description-of-PT-Spanish.pdf>
 19. ¿Qué es Arduino? | Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea. (2015). <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
 20. ¿Qué es la impresión 3D? | Programa para impresora 3D | Autodesk. (2019). <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>

21. Saraux, A., & Le Nen, D. (2009). Artrosis de la mano y la muñeca. *EMC - Aparato Locomotor*, 42(4), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S1286-935X\(09\)70889-5](https://doi.org/10.1016/S1286-935X(09)70889-5)
22. SolidBi. (2021). SOLIDWORKS - Qué es y para qué sirve. SolidBI. <https://solid-bi.es/solidworks/>
23. Visual Studio: IDE y Editor de código para desarrolladores de software y Teams. (2022). Visual Studio. <https://visualstudio.microsoft.com/es/>
24. Wieczorek, M. (2017). Generalidades sobre la artrosis: Epidemiología y factores de riesgo.
25. Rojals, V. M. (8 de marzo de 2021). Epidemiología, repercusión clínica y objetivos terapéuticos en la artrosis. *Revista de la Sociedad Española del Dolor*, 28, 4-10.
26. Montull Morer, S., Salvat, I., Novell, I., & Miralles Rull, I. (2004). La mano reumatológica: exploración y tratamiento. Revisión. *Fisioterapia (Madr., Ed. impr.)*, 55-77.
27. Araujo Segura, B. E., & Chirinos Rodríguez, A. J. (2017). Prototipo de sistema de complementación para la rehabilitación motriz de la mano derecha de las personas con artritis reumatoide. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Programa de Ingeniería Electrónica. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10757/622456>
28. Rogers, M. W., & Wilder, F. V. (2009). Exercise and hand osteoarthritis symptomatology: controlled crossover trial. *Journal of Hand Therapy*, 22(1), 10-18.
29. Østerås, N., Hagen, K. B., Grotle, M., Sand-Svartrud, A. L., Mowinckel, P., & Kjekken, I. (2014). Limited effects of exercises in people with hand osteoarthritis: results from a randomized controlled trial. *Osteoarthritis and Cartilage*, 22(9), 1224-1233.